

Entwicklung von Methoden  
zur optischen 3D-Vermessung in Bewegung

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

vorgelegt dem Rat der Fakultät für Mathematik und Informatik  
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von

**Diplom-Informatiker Andreas Martin Maximilian Breitbarth**  
geboren am 05. Juli 1984 in Jena

Gutachter

1. Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler, Friedrich-Schiller-Universität Jena
2. apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Ayoub Al-Hamadi, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Tag der öffentlichen Verteidigung: 13. November 2015

## Danksagung

Auf dem langen Weg von den Anfangsideen bis zur Fertigstellung dieser Dissertationsschrift wurde ich von einigen Menschen wesentlich unterstützt, so dass an dieser Stelle Ihnen mein herzlicher Dank gebührt.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler möchte ich im Besonderen dafür danken, dass er mich während meines Studiums für die digitale Bildverarbeitung als Vertiefungsrichtung begeisterte und mir auch nach dem Abschluss Unterstützung auf dem weiteren Weg zukommen ließ. Nicht zuletzt die regelmäßig kritischen Inhaltsdiskussionen, auch in Verbindung mit den Mitgliedern des Lehrstuhls für Digitale Bildverarbeitung, haben mir ein um das andere Mal wesentlich weitergeholfen.

Meinen Betreuern im Fraunhofer IOF Herrn Prof. Dr. Gunther Notni und Herrn Dr. Peter Kühmstedt gilt mein besonderer Dank für die Vergabe des Themas, der fortwährenden Begleitung meiner Arbeit, sowie den fachlich tiefgründigen und teilweise richtungsweisenden Gesprächen im Bereich der berührungslosen, dreidimensionalen Objektrekonstruktion.

Des Weiteren bin ich meinen langjährigen Kollegen in der Abteilung Optische Systeme und insbesondere der Arbeitsgruppe Optische Messtechnik des Fraunhofer IOF zu Dank verpflichtet. Insbesondere und stellvertretend sollen an dieser Stelle Andy Tänzer, Benjamin Buch und Kathrin Mäusezahl für die psychologische Unterstützung und ermunternden Worte, sowie auf fachlicher Seite Dr. Christoph Munkelt und Matthias Heinze hervorgehoben benannt sein. Herausragender Dank gebührt Eric Müller für die jahrelange, ergebnis- und innovationsorientierte Zusammenarbeit, verbunden mit ausgedehnten Diskussionen und Unterstützung bei der Auswertung einiger Experimente. Kevin Srokos möchte ich für die sehr tiefgründige Arbeitsweise während seiner Bachelorphase, sowie den hervorragenden Umsetzungsvorschlägen bei der Erstellung einiger Erklärungsskizzen danken.

Meinen Eltern Carola und Günter Breitbarth danke ich für den unermüdlichen Glauben an und das Vertrauen in mich, welche diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Keinesfalls an letzter Stelle gebührt meiner Freundin Dr. Sabine Stopp unendlicher Dank für den nicht immer leichten Beistand, ihre unerschöpfliche Geduld, Liebe und passenden Worte in den entsprechenden Momenten und Phasen.

Leider lässt sich eine wahrhafte Dankbarkeit  
mit Worten nicht ausdrücken.

---

*(Johann Wolfgang von Goethe)*

## Zusammenfassung

Zur dreidimensionalen Vermessung makroskopischer Objekte eignen sich optische Techniken unter anderem aufgrund ihres berührungslosen und damit zerstörungsfreien und unveränderlichen Vorgehens für eine Vielzahl von Anwendungen, die von Archäologie über Medizintechnik bis hin zu Soll-Ist-Vergleichen in der Qualitätssicherung und dem sogenannten „Rapid-Prototyping“ reichen. Der stereoskopischen Erfassung geht grundsätzlich eine Projektion temporärer Musterverteilungen in die Messszene zur Bereitstellung der Ansichtenverknüpfung voraus. Die Basis präziser Oberflächenrekonstruktionen ist dabei durch eine Vielzahl paarweise verschiedener Musterverteilungen gegeben. Neben der präzisen Oberflächenerfassung steht unter anderem in den benannten Anwendungsgebieten zunehmend auch die Aufnahme- und Rekonstruktionsgeschwindigkeit im Vordergrund, insbesondere für die Abbildung dynamischer Prozesse. Der damit existierende Zielkonflikt zwischen der Realisierung dynamischer Objektvermessungen, aber zur Ansichtenverknüpfung benötigtem Stillstand während der Mustersequenz ist Teil aktueller Forschung.

Existierende Ansätze zur Auflösung dieses Zielkonfliktes lassen sich einerseits in hardwareorientierte und auf Algorithmik basierte Ansätze andererseits untergliedern. Hardwareseitig wird der Vorteil ausgedehnter Mustersequenzen beibehalten und durch signifikante Beschleunigung der simultanen Musterprojektion und Bildaufnahme eine maximal mögliche Reduzierung der Relativbewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor realisiert. Diese Reduktion ist primär durch die Beschränkung der Projektionsgeschwindigkeiten von aktuell 250 Hz begrenzt, so dass dieses Vorgehen Einschränkungen hinsichtlich der maximal möglichen Bewegungsgeschwindigkeit unterliegt.

Alternativ bietet sich unter der Akzeptanz von Genauigkeitseinbußen die Verkürzung der Mustersequenz oder die algorithmische Kompensation existierender Relativbewegung an. Bestehende Verfahren verwenden hierbei zusätzliche Projektionsmuster zur Erkennung von Bewegung in der Bildebene oder beschränken sich auf eine Maximalbewegung von einer Periode bei der Verwendung von Streifenmustern in  $(1 + \cos)$ -Form. Erstmals wird mit der vorliegenden Arbeit eine Bewegungsdetektion im dreidimensionalen Raum durchgeführt, welche anschließend die Grundlage zur lokal differenzierten Bewegungskompensation liefert. Dabei existieren grundlegend keine Einschränkungen hinsichtlich der Bewegungsgeschwindigkeit und der Anzahl verwendeter, paarweise verschiedener Projektionsmuster mit trigonometrischer Intensitätsverteilung. Einzige Einschränkung ist die Oberflächenstarrheit des zu vermessenden Objektes während der Musterprojektion und simultanen Bildaufnahme.

Die Bewegungsbestimmung im dreidimensionalen Raum basiert auf der Ermittlung von Objektkoordinaten, welche unter bestmöglichem Ausschluss von Bewegung auf Bilddaten eines Zeitpunktes basieren. Hierbei werden ebenfalls erstmalig Informationen von zwei Kameraansichten verwendet, woraus sich entsprechend zahlreicher Simulationsergebnisse signifikante Genauigkeitsvorteile gegenüber der Datengewinnung aus ausschließlich einer Ansicht ergeben. Mithilfe des sich anschließenden Vorgangs der 3D-Bewegungskompensation lassen sich die dabei erzielten Ergebnisse in Abhängigkeit der Objektstruktur, sowie der Sequenzlänge an Projektionsmustern weiter verbessern. Dies ist sowohl an synthetischen Daten ermittelt, als auch an Aufnahmen eines 3D-Tischdigitalisierers zur präzisen Bestimmung von Objekten mit maximalem Durchmesser von 13 cm verifiziert.



## Summary

For three-dimensional measurements of macroscopic objects, optical techniques are suitable due to their contactless and nondestructive process for a variety of applications ranging from archeology and medical technology to target-performance comparisons in quality assurance and the so-called rapid prototyping. The stereoscopic acquisition requires a temporary pattern projection into the measuring field to provide the view link ahead. To avoid errors and to boost the accuracy of the three-dimensional object reconstructions, a variety of distinct patterns is recommended. Besides the precise surface detection, the designated application areas require an increased recording and reconstruction speed, in particular for the imaging of dynamic processes.

The so existing conflict between the realization of dynamic object surveys, but coinstantaneous immobility during the pattern sequence is part of ongoing research. Existing approaches for resolving this conflict can be divided into hardware modifications and algorithm based methods. On the hardware side, the advantage of extended pattern sequences is maintained. Furthermore, the relative motion between the measurement object and the 3D sensor is strongly decreased by significant acceleration of simultaneous pattern projection and image acquisition. This reduction is primarily limited by current digital projection rates of approximately 250 Hz, so that this approach is subject to constraints on the maximum possible speed of movement.

An alternative approach is the compensation of existing motion between the measurement object and the 3D sensor by several algorithms. Existing methods use an additional projection pattern for detecting motion in each camera plane, or are limited to the maximum of movement by one period when using fringe pattern in the  $(1 + \cos)$  form. In the present work, motion detection is performed in three-dimensional space, which provides the basis for locally differentiated motion compensation. Importantly, there are no restrictions on the object or sensor velocity or on the number of different projection patterns with trigonometric intensity distribution. Only the surface rigidity of the measurement object during the pattern projection and simultaneous image acquisition is restrictive.

The motion determination in the three-dimensional space is based on the estimation of the object coordinates that are acquired under the best possible exclusion of motion using image data at one point in time. Thus, out of the information of two points of view, 3D data with absolute position in 3D space are obtained for the first time. The results of a couple of simulations suggest significant accuracy benefits compared to existing single shot approaches. Using subsequent operations of 3D motion compensation, this accuracy is further increased depending on the 3D object surface and the number of used fringe pattern. To verify these facts, both synthetic data as well as real images acquired with a 3D table top system for precise object reconstruction of objects with a maximum diameter of 13 cm have been used.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>IV</b>
<b>Summary</b>	<b>V</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Notwendigkeit von 3D-Vermessung in Bewegung . . . . .	1
1.2 Gewählter Ansatz und eigener Beitrag . . . . .	5
1.3 Gliederung der Arbeit . . . . .	7
<b>2 Dynamische 3D-Vermessung: Stand der Technik</b>	<b>9</b>
2.1 Bewegungskompensation mithilfe alternativer Musterstrukturen . . . . .	10
2.2 Verwendung verkürzter Messsequenzen . . . . .	10
2.2.1 Anwendung von Epipolargeometrie bei der Korrespondenzsuche . . . . .	11
2.2.1.1 Grundprinzip und Anwendung für die 3D-Objektvermessung . . . . .	11
2.2.1.2 Verwendung von apriorischem Wissen . . . . .	13
2.2.2 Reduktion der Anzahl an Musterprojektionen . . . . .	14
2.3 Bereitstellung eines quasi-statischen Messsetups . . . . .	19
2.3.1 LED-Arrayprojektion . . . . .	20
2.3.2 Hochgeschwindigkeitsprojektion statistischer Intensitätsverteilungen . . . . .	22
<b>3 Theoretische Grundlagen der 3D-Bewegungskompensation</b>	<b>25</b>
3.1 Unterschiede zwischen statischen und dynamischen Messsetups . . . . .	25
3.2 Bewegungsdetektion . . . . .	27
3.2.1 Bestimmung grober 3D-Punktwolken durch Single-Shot-Analyse . . . . .	28
3.2.1.1 Zeilenweise 1D-Frequenzanalyse . . . . .	29
3.2.1.2 3D-Koordinatenbestimmung auf Phasenbasis . . . . .	30
3.2.1.3 Globale 2D-Frequenzanalyse . . . . .	31
3.2.1.4 Stereobasierte Punktwolkenermittlung . . . . .	32
3.2.1.5 Phasenverstetigung durch Bildsegmentvergleiche . . . . .	37

3.2.1.6	Datengetrieben fensterbasierte, lokale Frequenzanalyse . . . . .	40
3.2.2	Bestimmung von 6D-Bewegungsvektoren . . . . .	42
3.3	Bewegungskompensation . . . . .	44
3.3.1	Bestimmung von 2D-Punktkorrespondenzen . . . . .	44
3.3.2	Lokale Abhängigkeit zwischen Phasenschieben und 3D-Objektprofil . . . .	45
3.3.3	Beleuchtungsvariation . . . . .	47
3.3.3.1	Randabfall der Projektionshelligkeit . . . . .	47
3.3.3.2	Modulationsänderungen der Beleuchtung durch Objektbewegung	48
3.3.3.3	Variable Reflektivität durch Objektbewegung . . . . .	50
3.3.3.4	Variabler Schattenwurf sekundärer Objekte . . . . .	51
3.3.4	Einfluss von Intensitätsrauschen (SNR) . . . . .	52
3.4	Grenzen der Objektbewegung . . . . .	52
3.4.1	Schärfe von Einzelaufnahmen . . . . .	52
3.4.2	Mindestanzahl verschiedener Muster pro Sichtbereich . . . . .	54
3.5	Oberflächenkonstanz: Strukturfest vs. deformierbar . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Simulationen zur 3D-Bewegungskompensation</b>	<b>57</b>
4.1	Praktische Unterschiede zwischen 3D-Rückprojektion und Raytracing . . . . .	57
4.2	Konfiguration zur Bildsimulation . . . . .	59
4.3	3D-Objektrekonstruktion durch Einzelbildanalyse . . . . .	61
4.3.1	Globale 1D- und 2D-Fourieranalyse . . . . .	62
4.3.2	Fensterbasierte Fourieranalyse . . . . .	64
4.3.3	Verwendung von a priori Wissen über das Stereokamerasetup . . . . .	69
4.4	Bestimmung von 6D-Bewegungsvektoren mit libicp . . . . .	70
4.5	Lokale Bestimmung von Beleuchtungsparametern . . . . .	73
4.5.1	Direkte Parameterbestimmung im Prozess der Fourieranalyse . . . . .	73
4.5.2	Grundsätzliche Kompensationsmöglichkeiten . . . . .	75
4.5.3	Anwendung auf bewegte, makroskopische Objekte . . . . .	76
4.5.4	Grenzen bildbasierter Beleuchtungsbestimmung . . . . .	80
4.6	Fehlerquellen der dreidimensionalen Bewegungsdetektion und -kompensation . .	81
4.6.1	Genauigkeitsanforderungen an grobe 3D-Punktwolken . . . . .	81
4.6.2	Fehler in der 6D-Bewegungsschätzung . . . . .	84
4.6.3	Intensitätsrauschen in Aufnahmebildern . . . . .	86
4.6.4	Objekteigenschaft: Maximale Oberflächengradienten . . . . .	89
4.6.5	Rückprojektion grober 3D-Punktwolken . . . . .	90
4.6.6	Systemkalibrierung und Bestimmung von 2D-Punktkorrespondenzen . . .	91
4.7	Vergleich: Statische Setups, Matching-Verfahren, 3D-Bewegungskompensation . .	92

<b>5 Experimente mit Realdaten zur 3D-Bewegungskompensation</b>	<b>97</b>
5.1 Tischdigitalisierer „hiScanr“: Systemaufbau und Messmöglichkeiten . . . . .	97
5.2 3D-Ergebnisse mit statischem Messsetup . . . . .	98
5.3 Systemsetups für Messen in Bewegung . . . . .	100
5.4 Auswertung von Einzelaufnahmezeitpunkten . . . . .	102
5.5 Phasenverstetigung durch Bildsegmentvergleiche . . . . .	104
5.6 Bewegungskompensierte 3D-Ergebnisse . . . . .	107
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>113</b>
<b>A Weiterführende Ergebnisse</b>	<b>117</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>123</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>133</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>137</b>
<b>Algorithmenverzeichnis</b>	<b>139</b>
<b>Liste eigener Publikationen</b>	<b>141</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>145</b>
<b>Ehrenwörtliche Erklärung</b>	<b>147</b>



# Symbolverzeichnis

$\mapsto$	2D-2D-Punktkorrespondenz beziehungsweise 3D-auf-2D-Objektpunktabbildung
$\leftrightarrow$	euklidischer Abstand zwischen zwei Objekten
$\emptyset$	leere Menge
$\odot(\epsilon)$	arithmetischer Mittelwert betrachteter Fehler $\epsilon$
$(x, y)$	Pixel-/Bildposition $\in \mathbb{Z}$ innerhalb einer Kamerabildebene
$(x', y')$	Punktposition $\in \mathbb{R}$ innerhalb einer Kamerabildebene
$\widehat{(x, y)}$	homogene Darstellung eines 2D-Bildpunktes $(x, y)$ – Dimension $3 \times 1$
$\widehat{(x, y)}(i)$	$i$ -te Komponente des Vektors $\widehat{(x, y)}$
$(x, y)^p$	Pixelposition/Bildpunkt innerhalb der Projektorebene
$(x; y; z)$	Koordinatendarstellung eines konkreten dreidimensionalen Punktes
$\{O_{k,n}\}$	3D-Punktwolke des Aufnahmezeitpunktes $n$
$\{O_k\}^{\text{GT}}$	Ground-Truth- beziehungsweise Referenzpunktwolke
$\{O_k\}^{\text{Best-Fit}}$	vollautomatische Ausrichtung einer 3D-Punktwolke zu einem Referenzobjekt mithilfe des 3D-Inspektionsprogramms „Geomagic Qualify 12“ [Geo14]
$a$	Grundhelligkeit/Hintergrundbeleuchtung einer Messszene
$A$	Nullfrequenz im Frequenzspektrum $G$
$A_{px}$	Fläche eines Pixels auf dem Kamerasensor
$b$	(lokale) Modulation des Projektionsmusters
$B$	Position $\in \mathbb{R}$ innerhalb einer zweidimensionalen Bild- oder Projektorebene
$c$	Kameranummer; zumeist gilt $c \in \{1, 2\}$ , konkrete Benennung durch $c1$ und $c2$
$C$	positiver Teil des Frequenzspektrums $G$
$C^*$	komplex konjugierter Anteil des Frequenzspektrums $G$
$d$	räumlicher Abstand zwischen Projektionssystem und Kamera
$D$	Phasen-Differenzen innerhalb der Achternachbarschaft einer Pixelposition
$E_{i,j}$	Einheitsmatrix der Dimension $i \times j$
$E_V$	Beleuchtungsstärke des Projektionssystems
$EK$	Eindeutigkeitswert einer Überlagerung von Bildsegmenten $\mathcal{S}$
$f$	konkrete Bildfrequenz
$F$	Anzahl an Frequenzen innerhalb eines Frequenzspektrums $G$
$f_0$	Fundamentalfrequenz eines Interferogramms
$f_m$	mittlere Ortsfrequenz einer zweidimensionalen Intensitätsverteilung
$f_x, f_y$	konkrete Frequenz in $x$ - beziehungsweise $y$ -Dimension eines Eingangsbildes $g$
$f_{ps}$	Minimum aus Projektions- und Bildaufnahme rate
$f_{ps}^{3D}$	Bildrate an dreidimensionalen Ergebnissen pro Sekunde
$g$	Eingangsbild für Fourieranalyse
$g_{\text{Teil}}$	Ausschnitt/Abschnitt von $g$ zur fensterbasierten Bildanalyse
$\bar{g}$	frequenzgefiltertes Bild im Ortsraum
$\hat{g}$	Hamming-gefiltertes Eingangsbild $g$

$G$	Frequenzspektrum von $g$
$\overline{G}$	frequenzgefiltertes Spektrum
$\widehat{G}$	frequenzgefiltertes Spektrum eines zuvor Hamming-gefilterten Eingangsbildes $\widehat{g}$
GC	Gray-Code-Muster, konkrete Benennung durch GC1 bis GC7
$h$	Höhe eines Objektpunktes beziehungsweise sein Abstand zur Referenzebene
$h_{1D/2D}$	Hammingfunktion eindimensional/zweidimensional
$i, j, l, m$	Laufvariablen
$j$	Ordnung des Vielfachen der Trägerfrequenz
$I$	Intensitätsbild beziehungsweise Interferogramm
$\overline{I}$	bewegungskompensiertes Intensitätsbild beziehungsweise Interferogramm
$\tilde{I}_n^c$	mittlerer Grauwert, betrachtet über eine zeitliche oder auch raum-zeitliche Sequenz von Grauwerten
$I^P$	zum Ausgangsinterferogramm $I^O$ phasenverschobenes Interferogramm
$k$	Index eines konkreten 3D-Objektpunktes $O$ ; Index eines konkreten Sehstrahls $r$ zur Beobachtung beziehungsweise Abbildung des Objektpunktes $O_k$
$k_x, k_y$	Größe der zur 2D-Punktkorrelation betrachteten Pixelumgebung um $(x, y)$
$\text{KOS}^c$	zweidimensionales Koordinatensystem der Kamera $c$
$\text{KOS}^{n=1}$	dreidimensionales Koordinatensystem, welches auf der Blickrichtung der als Master definierten Kamera $c$ zum ersten Aufnahmezeitpunkt $n = 1$ der aktuellen Messsequenz entspricht
$\text{KOS}^P$	zweidimensionales Koordinatensystem des Projektionssystems
$\text{KOS}^{\text{Welt}}$	a priori definierten Weltkoordinatensystem (dreidimensional)
$l$	Index eines beliebigen Oberflächenpunktes des Messobjektes $\mathbb{O}$ ; Index eines Bildsegmentes $\mathcal{S}$
$l_0$	räumlicher Abstand zwischen Kamera/Projektionssystem und Referenzebene $R$
$M$	Bildgröße [Pixel] (in einer Ausdehnungsrichtung)
$n$	Bildnummer innerhalb einer Messsequenz
$N$	Bildgröße [Pixel] (in der zur mit $M$ beschriebenen Bildausdehnung um 90 Grad gedrehten Richtung); Anzahl paarweise disjunkter Intensitätsverteilungen einer 3D-Messsequenz
$\mathbb{N}$	Wertebereich natürlicher Zahlen, unter anderem für zweidimensionale Bildpunktkoordinaten
$o$	Lage des optischen Zentrum einer Kamera im Raum
$O$	dreidimensionaler Objektpunkt
$\widehat{O}_k$	homogene Darstellung eines 3D-Objektpunktes $O_k$ – Dimension $4 \times 1$
$\mathcal{O}$	sogenannte Groß-O-Notation zur Beschreibung der asymptotisch oberen Schranke der Berechnungskomplexität
$\mathbb{O}$	Messobjekt beziehungsweise die Menge aller Objektpunkte $\{O_k\}$
$p_0$	Streifenbreite einer $(1 + \cos)$ -Periode auf der Referenzebene $R$
$P^{3 \times 4}$	Projektionsmatrix der Dimension $3 \times 4$ als auf Kalibrierdaten des Sensorsystems basierender Abbildungsvorschrift zwischen einer konkreten, zweidimensionalen Sensorebene und einem a priori definierten, dreidimensionalen (Welt-)Koordinatensystem



---

$P_{on}, P_{off}$	als Hell- und Dunkelbild bezeichnete Projektionsmuster mit homogen weißer beziehungsweise schwarzer Intensitätsverteilung
$P_T$	zweidimensionale Musterverteilung zur Bewegungsbestimmung in 2D-Bildebenen
$\mathcal{P}$	beliebiger Bildpunkt eines Segmentes $\mathcal{S}$
$q1, q3$	25- sowie 75-Prozent-Quantile einer Stichprobe
$Q$	Frequenzpeak innerhalb des Spektrums $G$ mit der Breite $[f - \epsilon_{\min}, f + \epsilon_{\max}]$
$r$	Sehstrahl zwischen einer Kamerabildebene und einem Objektpunkt $O$ ; Radius eines verwendeten Kugelobjektes
$R$	Referenzebene zur 3D-Koordinatenbestimmung aus Einzelbildern; Zuverlässigkeitswert bei der $2\pi$ -Verstetigung von Rohphasen nach Herráez
$R^{\text{ICP}}$	Rotationsmatrix innerhalb des ICP-Algorithmus mit den Dimensionen $3 \times 3$ , dabei bezeichnet beispielsweise $R_{(1,1)}^{\text{ICP}}$ den Matrixeintrag der ersten Spalte und ersten Zeile
$R^{\text{Soll}}$	$3 \times 3$ -Rotationsmatrix, deren Werte der synthetisch induzierten beziehungsweise im Messsystem eingestellten Ground-Truth-Rotationsbewegung entsprechen
$R_{v_{\text{rel}}}$	relative Geschwindigkeit einer Rotationsbewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor
$\mathbb{R}$	Wertebereich reeller Zahlen, unter anderem für dreidimensionale Objektpunktkoordinaten
$S_{\mathbb{O}}$	Schnittpunkt eines Sehstrahles $r$ mit der Oberfläche des betrachteten Messobjektes $\mathbb{O}$
$\mathcal{S}_{k,n}^c$	Bildsegment mit Nummerierung $k$ eines Interferogramms $I^c$ zum Aufnahmezeitpunkt $n$
$\mathcal{S}_{k,n}^{c1,\text{trans}}$	in die Kamerabildebene $c2$ transformiertes Bildsegment $k$ aus Bildebene $c1$
$t$	Aufnahmezeitpunkt
$t^{\text{ICP}}$	Translationsvektor innerhalb des ICP-Algorithmus mit der Dimension $3 \times 1$
$t^{\text{Soll}}$	$3 \times 1$ -Translationsvektor synthetisch induzierter, translatorischer Ground-Truth-Bewegung
$t_{v_{\text{rel}}}$	relative Geschwindigkeit einer Translationsbewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor
$T_{\text{Seq}}$	Zeitspanne der Musterprojektion und Bildaufnahme einer Messsequenz
$T_{\text{Seq}}^p$	Teil $p$ einer Messsequenz, der genau eine Referenzansicht (Bezugsergebnis für Bewegungsschätzung) besitzt
$T(t)$	Belichtungszeit eines Bildes zum Zeitpunkt $t$
$thr$	empirisch bestimmter und systemabhängiger Schwellwert bei der Ausmaskierung unbeleuchteter Bildbereiche
$u, v$	Parameter zur Bestimmung von Beleuchtungswerten $a$ und $b$
$v_{\text{rel}}$	Relativgeschwindigkeit zwischen Messobjekt und 3D-Sensor
$V$	Vollständigkeit einer 3D-Punktwolke, definiert aus der Anzahl an rekonstruierten Objektpunkten $O_k$ im Verhältnis zu 3D-Punktzahl der Sollpunktwolke $\{O_k\}^{\text{GT}}$
$Var$	Varianz

$V_k$	Vollständigkeit einer dreidimensionalen Punktwolke in Prozent gegenüber dem Ground-Truth-Punktmodell
$w$	Größe der Fensterverschiebung in Pixel bei Analyseverfahren auf Teilbildern $g_{\text{Teil}}$
$w_{\min}, w_{\max}$	sogenannte Whisker innerhalb einer Boxplot-Visualisierung
$X, Y, Z$	Achsenbezeichnungen eines dreidimensionalen Koordinatensystems
$\alpha_{\text{abs}}$	Absolutposition des Kippspiegels im 3D-Messsystem “hiScanp”
$\alpha_{n,n+1}$	Rotationsbewegung um die X-Achse zwischen den Aufnahmezeitpunkten $n$ und $n + 1$
$\delta I$	Grauwertabweichung von theoretischem Intensitätsverlauf
$\Delta\phi$	Differenz relativer Phasenwerte $\phi_{\text{rel}}$ adjazenter Bildpunkte
$\Delta\phi_{R_n}$	Phasenschub zwischen erstem und $n$ -tem Bild einer Messsequenz
$\Delta\phi_{R_n}^{\text{Seq}}$	Phasenschub über die Messsequenz Seq betrachtet
$\Delta s$	Bewegungsstrecke beziehungsweise räumliche Objektpunktverschiebung in [Wei07]
$\epsilon$	Ausdehnung eines Frequenzpeaks mit $\epsilon_{\min}$ dem kleinsten und $\epsilon_{\max}$ dem größten Frequenzwert
$\epsilon(\phi_{\text{rel}})$	Rohphasenfehler
$\epsilon_{\max}$	neben der maximalen Frequenzpeakausdehnung auch die Bezeichnung für den maximal existierenden Fehlerwert
$\epsilon^{3D}$	als 3D-Fehler bezeichnete euklidische Distanz zwischen den dreidimensionalen Koordinaten eines Objektpunktes $O_k$ zur entsprechenden, dreiecksbasierten Oberflächendarstellung des Ground-Truth-Modells
$\epsilon(R^{\text{ICP}})$	Rotationsanteil des Fehlers bei der Bewegungsbestimmung
$\epsilon(t^{\text{ICP}})$	translatorischer Anteil des Fehlers bei der Bewegungsbestimmung
$\epsilon(\phi)$	Phasenfehler
$\gamma_{\text{abs}}$	Absolutposition des Drehtisches im 3D-Messsystem “hiScanp”
$\gamma_{n,n+1}$	Rotationsbewegung um die Z-Achse zwischen den Aufnahmezeitpunkten $n$ und $n + 1$
$\gamma_{O_k}$	Oberflächengradient, definiert durch den Winkel zwischen den Normalenvektoren des 3D-Sensors und der Objektoberfläche
$\gamma_{\text{Seq}}$	Rotationsbewegung um die Z-Achse über die Messsequenz Seq betrachtet
$\Im$	Imaginärteil eines komplexen (Zwischen-)Ergebnisses
$\mu$	Mittelwert eines Gaußschen Glättungsfilters
$\nabla$	Intensitätsgradient am Bildpunkt $(x, y)$
$\phi^m$	Phasenverteilung auf dem Messobjekt beziehungsweise in der Messszene
$\phi^p$	Phasenverteilung auf der Projektorebene
$\phi_{\text{abs}}$	Feinphasen; $2\pi$ -verstetigte, global eindeutige Werte
$\widehat{\phi_{\text{abs}}}$	$2\pi$ -verstetigte Feinphasen einer Kamerabildebene mit unangepasstem Wertebereich gegenüber Feinphasen der anderen Kamerabildebene
$\phi_{\text{rel}}$	Rohphasen; Werte innerhalb $[-\pi, \pi)$
$\Re$	Realteil eines komplexen (Zwischen-)Ergebnisses
$\rho$	Korrelationswert zeitlicher oder raum-zeitlicher Intensitätsverteilungen
$\sigma$	Varianz eines Gaußschen Glättungsfilters

---

$\sigma^{3D}$	Standardabweichung einer berechneten 3D-Punktwolke $\{O_k\}$ in Bezug zu dreiecksbasierten Ground-Truth-Oberflächendaten
$\sigma^{Bi}$	3D-Standardabweichung eines definierten Objektbereiches $Bi$
$\tilde{\sigma}$	Median aus einer Mehrzahl an Werten von 3D-Standardabweichungen $\sigma^{3D}$
$\tau^{2D}$	zweidimensionaler Bewegungsvektor, bestehend aus zwei Translationsparametern innerhalb einer Bildebene
$\tau^{6D}$	sechsdimensionaler Bewegungsvektor, wobei drei Translations- und drei Rotationsparameter enthalten sind
$T^{6D}$	Vektorfeld aus sechsdimensionalen Bewegungsvektoren $\tau^{6D}$
$\xi_{\text{RMS}}$	RMS-Rauschlevel, definiert durch den quadratischen Mittelwert an Grauwerten bezüglich der Verteilung an Intensitätsrauschen
$\widehat{\xi_{\text{RMS}}}$	maximale Amplitude eines RMS-Rauschlevels $\xi_{\text{RMS}}$ in Grauwerten
$\zeta_{\text{KK}}$	Triangulationswinkel zwischen den zwei verwendeten Kameras $c1$ und $c2$
$\zeta_{\text{KP}}$	Triangulationswinkel zwischen einer Kamera $c$ und dem Projektionssystem



## Abkürzungsverzeichnis

1D	eindimensional
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
6D	sechsdimensional
Abschn.	Abschnitt innerhalb dieser Arbeit
AWFT	adaptiv fensterbasierte Frequenzanalyse auf FFT-Basis, wobei die Fenstergröße und Fensterlage durch den Bildinhalt bestimmt und adaptiv angepasst ist
AWFTP	FTP-Verfahren mit Bildinhalt bestimmter, adaptiver Fenstergröße
$B_i$	definierter Objektbereich (innerhalb des Messobjektes „geometrische Formen“)
CAD	engl. „Computer Aided Design“, rechnergestützte Konstruktion
DLP	auf Mikrosiegeln (DMDs) basierende Projektionstechnik
DMD	engl. Digital Micromirror Device
FFT	schnelle Fouriertransformation
FT	Frequenzanalyse basieren auf FFT-Algorithmen
FTP	Fourier-Transformations-Profilometrie
GW	Grauwert(e); Wertebereich: $[0, 255] \in \mathbb{N}$
ICP	engl. „iterative closest points“, Verfahren zur Registrierung mehrdimensionaler Punktmengen
IFFT	Inverse der schnellen Fouriertransformation
LCoS	engl. „Liquid Crystal on Silicon“, lichtreflektierende Microdisplay mit einer Bildpunktanzahl größer UXGA
LED	engl. „light-emitting diode“, lichtemittierendes Halbleiter-Bauelement
LP	Linienpaare
Marker	Markierungsposition innerhalb einer Bildaufnahme
mask	Binärmaske
PC	Personal Computer / Arbeitsplatzrechner
PMD	Photomischdetektor; Sensor innerhalb einer ToF-Kamera (siehe auch <i>ToF</i> )
Proj.	Projektor beziehungsweise Projektionssystem
px	Pixel-Einheit
SSSA	Stereo-Single-Shot-Analyse: Einzelbildanalyse aus zwei verschiedenen Perspektiven $c$ eines Zeitpunktes $t$
ToF	Kamerasystem, welches flächenhaft Entfernungsdaten basierend auf Laufzeitlängen ausgesendeter Lichtpulse bestimmt
ÜLP	Anzahl überlagernder Pixel aus einer 3D-Rückprojektion und einer Menge an Segmentbildpunkten
UNDEF	von weiteren Berechnungen ausgeschlossener Wert (PC-spezifisch: maximaler Gleitkommawert - bei 64-Bit-Systemen $3,402823466 \times 10^{38}$ )

USB	engl. „Universal Serial Bus“, Bussystem zur Verbindung von Computern mit Peripheriegeräten
UXGA	Pixelauflösung eines Anzeige- oder Projektionsgerätes mit $1.600 \times 1.200$ Bildpunkten
$V_i$	Verfahren mit verringerter Musteranzahl, konkret V1 bis V8
$VV_i$	Vergleichsverfahren zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten, konkret VV1 bis VV4
WFT	fensterbasierte Frequenzanalyse auf FFT-Basis, wobei die Fenstergröße und Fensterverschiebung über das Analysebild global determiniert ist

# Kapitel 1

## Einleitung

Die dreidimensionale Erfassung makroskopischer Objekte stellt unter anderem einen wesentlichen Bestandteil der Qualitätssicherung und des sogenannten „Rapid Prototyping“ dar [Gor10]. Grundsätzlich werden dabei taktile und optische Verfahren differenziert. Beiden Ansätzen gemein ist die Möglichkeit, hochpräzise 3D-Koordinaten sowohl einfacher als auch komplexer Objekte zu bestimmen. Die Präzision beziehungsweise im Weiteren auch als Genauigkeit bezeichnete Eigenschaft einer ermittelten 3D-Koordinate  $O_k$  definiert sich durch die euklidische Distanz von  $O_k$  zum nächstgelegenen Punkt des sogenannten „Ground-Truth“-Modells, welches insbesondere im Bereich der Qualitätssicherung als CAD-Datensatz gegeben ist. Von präzisen beziehungsweise hochpräzisen Messergebnissen wird gesprochen, wenn nach [Not07] die 3D-Standardabweichung  $\sigma^{3D}$  der euklidischen Distanzen zwischen errechneten 3D-Koordinaten und dem Ground-Truth-Modell kleiner als 1/10.000 respektive 1/100.000 des Messvolumendurchmessers ist.

Ein entscheidender Vorteil optischer Messverfahren gegenüber taktiler Antastung ist durch die berührungslose und damit Objekt unveränderliche Erfassung gegeben. Unter Verwendung zweidimensionaler Sensoren zur flächenhaften Erfassung von Bilddaten existiert des Weiteren ein signifikanter Geschwindigkeitsvorteil, insbesondere für lateral ausgedehnte Messobjekte [Gor10]. Auch wenn taktile Verfahren zur dreidimensionalen Erfassung von Objektkoordinaten insbesondere durch die Möglichkeit der Vermessung von Hinterschnidungen, sowie spiegelnder Oberflächen ebenso Vorteile besitzen, soll der Fokus in dieser Arbeit auf optischen 3D-Messverfahren mit aktiver Musterprojektion liegen. Die Verwendung aktiver Musterprojektion als temporäre Textur empfiehlt sich allem voran bei Messobjekten mit farblich und von der 3D-Struktur weitgehender Homogenität, bei denen photogrammetrische Ansätze – optische Messverfahren ohne aktive Musterprojektion – an ihre Machbarkeitsgrenzen stoßen.

Aus der Vielzahl von Ansätzen zur dreidimensionalen Objektvermessung durch Triangulation zwischen mindestens zwei Kameraeinheiten oder einer Kamera und einer Projektionseinheit unter Nutzung aktiver Musterprojektion sollen für den Inhalt dieser Arbeit 8-Bit-Grauwertverteilungen in  $(1 + \cos)$ -Form ausgewählt werden. Vorgehensweisen anderer Ansätze, sowie Vor- Nachteile dieser gegenüber  $(1 + \cos)$ -Mustern werden in Abschnitt 2.2.2 beschrieben und diskutiert.

### 1.1 Notwendigkeit von 3D-Vermessung in Bewegung

Grundsätzlich werden temporäre Objekttexturen zur möglichst eindeutigen Bestimmung von *Punktkorrespondenzen* zwischen zwei Sensorebenen verwendet. Ein Tupel aus 2D-Sensorpunkten verschiedener Ansichten wird genau dann als Punktkorrespondenz bezeichnet, wenn die Sensorpunkte Abbildung ein und desselben 3D-Objektpunktes  $O_k$  sind [Luh00, Abschnitt 5.5] – in Abbildung 1.1 ist dies unter anderem bei Betrachtung des Objektpunktes  $O_k^1$  für die rot markierten Bildpunkte  $I_1^{c1}(x(O_k^1), y(O_k^1))$  und  $I_1^{c2}(x(O_k^1), y(O_k^1))$  gegeben. Für die Korrespondenzbestim-

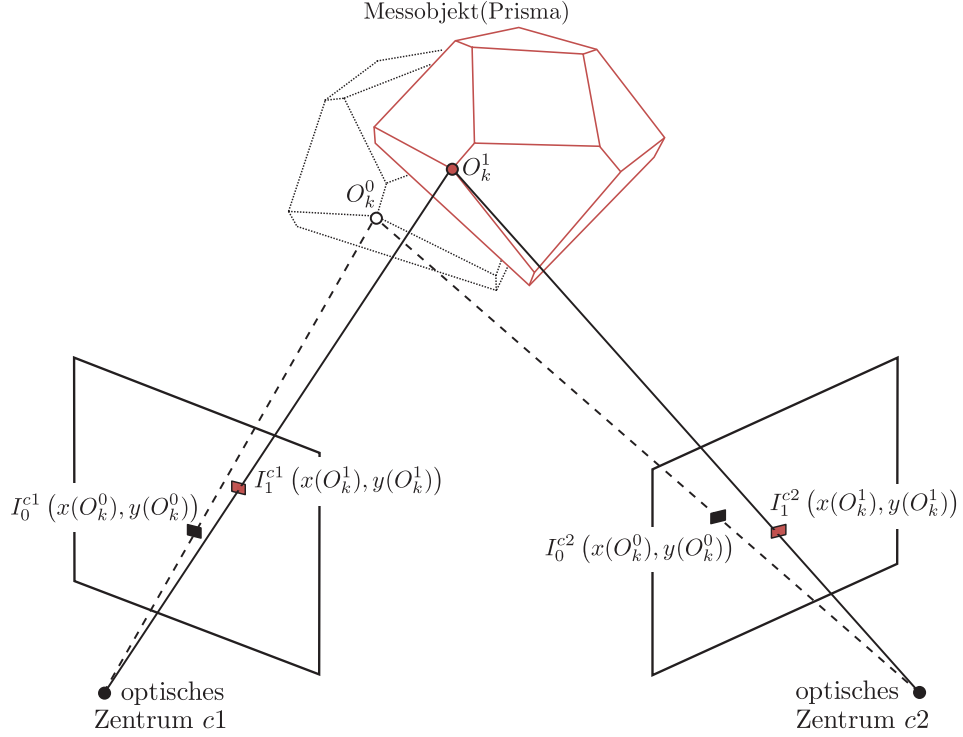


Abbildung 1.1: Visualisierung der veränderlichen Abbildung ein und desselben Objektpunktes  $O_k$  in zwei Kameraebenen  $c1$  und  $c2$  bei relativer Bewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor, gekennzeichnet mit durchgehenden Linien. Der Abbildungsursprung ( $O_k^0$ ) innerhalb der Messszene für je eine feste Sensorposition  $(x, y)$  pro Kamera ist mithilfe gestrichelter Linien beispielhaft veranschaulicht.

mung stellt die aktive Musterprojektion eine Art Objektpunktcodierung bereit. Im konkreten Fall von  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen ist die Codierung durch die Phasenlage  $\phi$  gegeben. Die Beziehung zwischen der Phase  $\phi(x, y)$  und dem auf einen Kamerasensor abgebildeten Intensitätswert  $I(x, y)$  beschreibt unter anderem Kreis [Kre96] wie folgt:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y)] . \quad (1.1)$$

Neben der gesuchten Phase  $\phi(x, y)$  besitzt Gleichung (1.1) zwei weitere Unbekannte: Die additive Hintergrundbeleuchtung  $a(x, y)$ , sowie die multiplikativ mit der Phase verknüpfte Modulation  $b(x, y)$  des projizierten Musters. Zur eindeutigen Bestimmung dieser drei Unbekannten wird ein Gleichungssystem mit mindestens drei Gleichungen benötigt. Dieser Forderung lässt sich durch die Projektion von im Minimum  $n = 3$  paarweise verschiedenen Intensitätsverteilungen nachkommen. Die Verschiedenheit bezieht sich dabei auf die Betrachtung im Mess- beziehungsweise Objektraum, sodass sich zur Realisierung die Verwendung ausschließlich einer  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung empfiehlt, welche von Projektionszeitpunkt  $t$  zum nachfolgenden Zeitpunkt  $t + 1$  in seiner Phase verschoben wird. Gleichung (1.1) erweitert sich damit um den Interbild-Phasenschub  $\Delta\phi_{R_n}$  zu der Darstellung

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + \Delta\phi_{R_n}] . \quad (1.2)$$

Die Bestimmung des Wertes  $\phi(x, y)$  basiert per Definition auf mindestens drei jeweils simultan ausgeführten Musterprojektionen und Bildaufnahmen und damit einer Objektpunktcodierung zu



mindestens drei verschiedenen Zeitpunkten  $t \in T_{\text{Seq}}$ . Gleichfalls beschreibt die Codierung mithilfe der temporären Textur den Zusammenhang zwischen einem Punkt  $(x, y)$  auf dem Kamerasensor  $c$  und einem Objektpunkt  $O_k$ . Da dieser Zusammenhang wie in Abbildung 1.1 visualisiert für den Fall relativer Bewegung zwischen dem Kamerasensor und dem Messobjekt während der Zeitspanne einer Messsequenz  $T_{\text{Seq}}$  nicht mehr konstant ist, muss während  $T_{\text{Seq}}$  eine statische Messsituation zur Verfügung stehen. Wie den Analysen von Lutzke et al. [Lut13] entnommen werden kann, erhöht sich bis zu einer Art Sättigung die Präzision einer 3D-Messung mit der Anzahl verwendeter, paarweise verschiedener Muster. Konkret hat sich daher bei der Verwendung von  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen zur eindeutigen Punktcodierung der folgende Inhalt einer Mustersequenz zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten nach [Sch00] etabliert und soll im Folgenden als „vollständige Messsequenz“ bezeichnet werden:

- 1.) **1 Dunkelbild und 1 Hellbild** – globale Projektion logischer 0, sowie logischer 1  
 $\hookrightarrow$  Schwellwertbestimmung für Gray-Code-Quantisierung in  $\{0, 1\}$   
 $\hookrightarrow$  Möglichkeit der Intensitätsnormierung innerhalb der Phasenmuster aus 3.) und 5.)
- 2.) **7 Gray-Code-Muster** ( $\{0, 1\}$ -Bit-Verteilung: siehe Abbildung 1.2)  
 $\hookrightarrow$  Codierung maximal 64  $(1 + \cos)$ -Perioden in 3.) zur Beseitigung von Mehrdeutigkeiten
- 3.) **16 Phasenmuster mit  $(1 + \cos)$ -Grauwertverteilung und  $\Delta\phi_{R_n} = 22,5^\circ$**   
 $\hookrightarrow$  Informationsträger zur Codierung von Objektpunkten  $O_k$  in einer Richtung
- 4.) **7 Gray-Code-Muster orthogonal zur Projektionsrichtung in 2.)**  
 $\hookrightarrow$  Codierung von 64  $(1 + \cos)$ -Perioden der zweiten Projektionsrichtung – siehe 5.)
- 5.) **16 Phasenmuster mit orthogonaler Projektionsrichtung bezüglich 3.)**  
 $\hookrightarrow$  Informationsträger in zweiter Richtung zur global eindeutigen Objektpunktcodierung

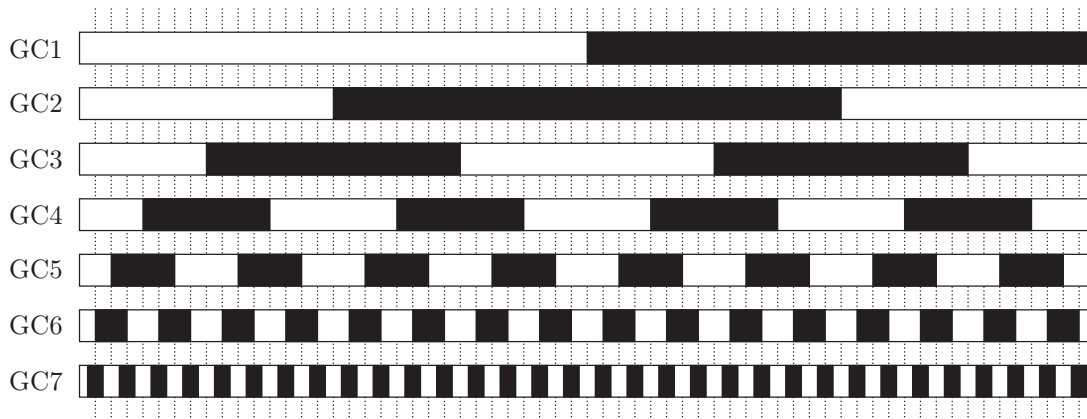


Abbildung 1.2: Veranschaulichung der Schwarz-Weiß-Codierung einer siebenstufigen Gray-Code-Sequenz nach Kühmstedt [Küh97]. Dabei ist die Projektionsreihenfolge mit GC1 bis GC7 bezeichnet. Mithilfe der vertikalen, gestrichelten Linien ist die jeweilige Lage der 64  $(1 + \cos)$ -Perioden veranschaulicht und zeigt in Bezug zur feinsten Gray-Code-Strukturierung GC7 die Verschiebung von der Hälfte einer Periodenbreite auf.

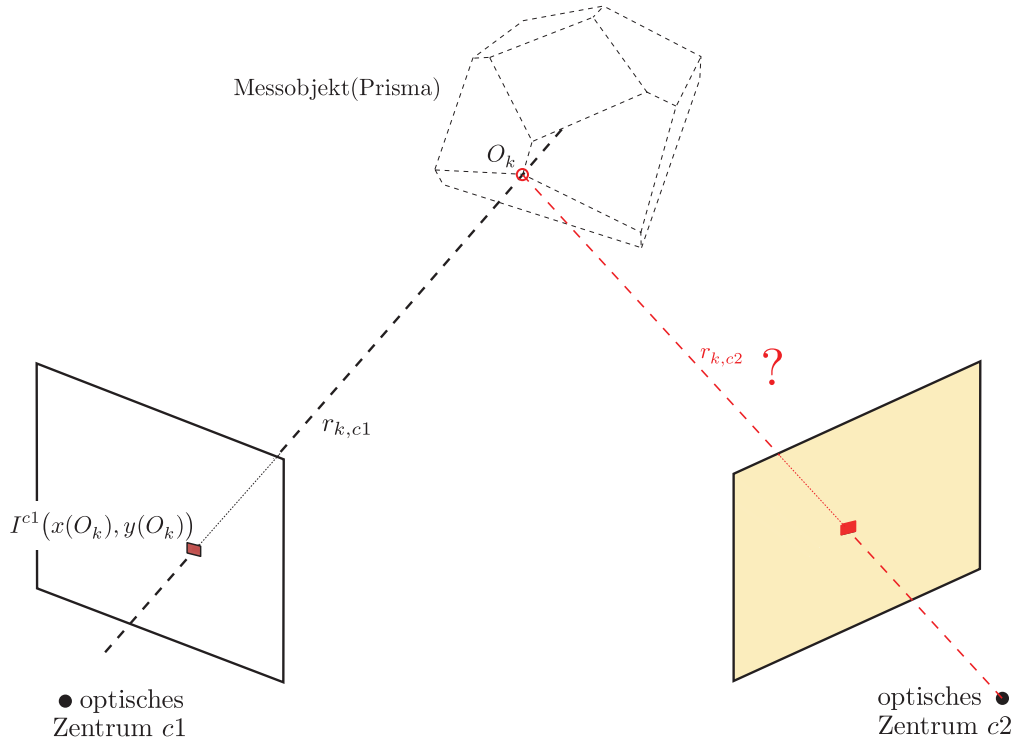


Abbildung 1.3: Durch unbekannte Lage des Messobjektes im Raum und relativ zum 3D-Sensor ergibt sich für jeden in einer Kamerabildebene  $c$  beobachteten Objektpunkt  $O_k$  grundsätzlich ein zweidimensionaler Suchraum in der anderen Kamerabildebene, hier hellgelb markiert.

Die Notwendigkeit der bei diesem als *Phasogrammetrie* bezeichneten Vorgehen zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten zweiten, um  $90^\circ$  gedrehten Projektionsrichtung ergibt sich durch den, wie in Abbildung 1.3 dargestellten, grundsätzlich zweidimensionalen Suchraum für Punktkorrespondenzen innerhalb einer Kamerabildebene  $c$ . Die Länge der beschriebenen Mustersequenz von 48 Einzelmustern mit 16 Phasenmustern pro Projektionsrichtung besitzt den Vorteil hoher Robustheit gegenüber verschiedenartigen Störungen, wie Kamerarauschen und nicht linearen Grauwertverteilungen bei Projektion und Bildaufnahme. Andererseits ergibt sich eine lange Zeitspanne  $T_{\text{Seq}}$  des zwangsweisen Stillstandes von Messobjekt und 3D-Sensor. Wird von einer Musterprojektion durch digitale Systeme ausgegangen, liegt die maximale Rate der Musterwechsel pro Sekunde  $fps$  bei Multi-Media-Projektoren im Bereich  $[60, \dots, 75]$ . Durch eine Beschränkung der Abbildung auf ausschließlich 8-Bit-Grauwertintensitäten und für den industriellen Einsatz spezialisierte Projektionschips sind aktuell im Maximum 250 Bildwechsel pro Sekunde möglich [Tex14]. Daraus ergibt sich für die vollständige Messsequenz eine Zeitspanne der stationären Situation von 0,64 bis 0,8 Sekunden bei Multi-Media-Projektoren; unter Verwendung erwähnter Spezialsysteme knapp 0,2 Sekunden. Die Vermessung lateral ausgedehnter Objekte, welche durch Anforderungen an die Messgenauigkeit ausschließlich mit einer Mehrzahl an Messfeldern erfasst werden können, erfolgt durch Verschiebung des Messobjektes oder 3D-Sensors zwischen den einzelnen Messvorgängen [Bre11a] [BB14b]. Dieses „Start-Stopp“-Prinzip ermöglicht die Beibehaltung der statischen Messsituation während der Musterprojektion und simultanen Bildaufnahme, stellt im industriellen Einsatz aber einen hohen Zeit- und damit Kostenfaktor dar.

In den vergangenen Jahren wurde der Wunsch vieler Anwender und Industriezweige nach signifikanten Beschleunigungen berührungslos, dreidimensionaler Vermessungen makroskopischer Objekte immer stärker. Auch die Nachfrage nach Vermessungen von Objekten in Bewegung hat stetig zugenommen. Grundsätzlich soll dies keinesfalls mit einer Verschlechterung der Messgenauigkeit verbunden sein, vielmehr sind gleichbleibende oder gar weiter verbesserte 3D-Resultate anzustreben. Hierzu lassen sich drei Kategorien möglicher Herangehensweisen unterscheiden, welche grundsätzlich auch in Kombination verwendet werden können:

- signifikante Beschleunigung von Projektions- und Bildaufnahme rate  $fps$  durch Anpassungen im Hardware-Bereich
- Reduktion der Anzahl verwendeter Muster pro Messsequenz, auch unter Nutzung von apriorischem Wissen
- Detektion und Kompensation der existierenden Relativbewegung

Während die ersten beiden Punkte in den Abschnitten 2.3 und 2.2 diskutiert werden, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Bewegungsdetektion und anschließenden -kompensation.

## 1.2 Gewählter Ansatz und eigener Beitrag

Wie dem vorangegangenen Abschnitt 1.1 entnommen werden kann, beinhaltet die vorliegende Arbeit Herangehensweisen, Methoden und Algorithmen zur Detektion, sowie daran anschließenden Kompensation von Bewegung. Dabei wird als *Bewegung* ausschließlich die Relativbewegung  $v_{rel}$  zwischen dem makroskopischen Messobjekt  $\odot$  und dem in Abbildung 1.4 schematisch darge-

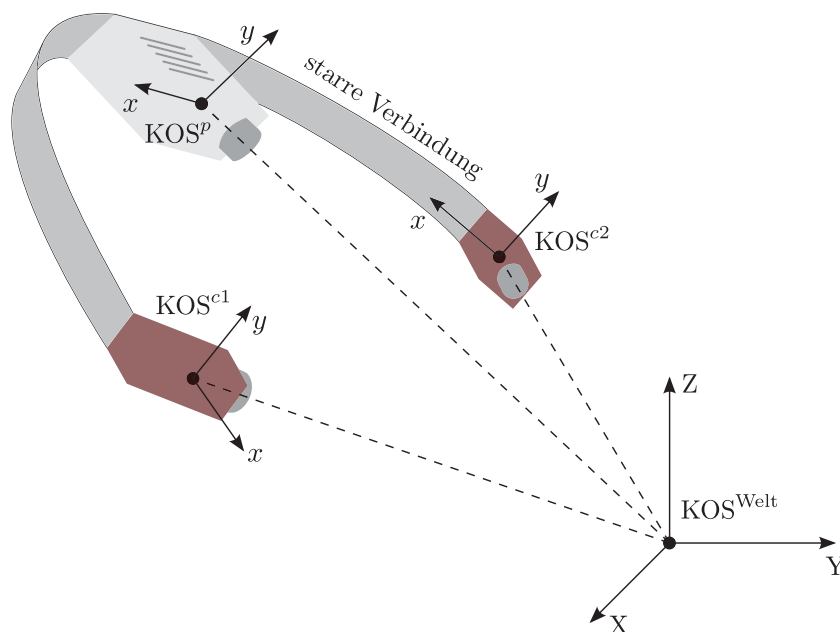


Abbildung 1.4: Komponenten und Grundanordnung des als 3D-Sensor bezeichneten Messsystems, bestehend aus zwei Kameras und einem mittig positionierten Projektions-system. Zwischen diesen drei Komponenten existiert verfahrensbedingt eine starre Verbindung.

stellten 3D-Sensor während  $T_{\text{Seq}}$  betrachtet; ein Bezug zu einem a priori definierten, statischen Weltkoordinatensystem  $\text{KOS}^{\text{Welt}}$  existiert nicht. Als *3D-Sensor* soll die starre Vereinigung aus zwei Flächenkameras  $c1$  und  $c2$  und einem Projektionssystem bezeichnet sein. Die starre Verbindung zumindest zwischen einer Kamera und dem Projektionssystem ist zwingend gegeben, da seitens des Projektionssystems keine Datenaufnahme stattfinden kann und damit ohne externe Hardware keine Lagebestimmung dieser Einheit möglich ist. Zur Steigerung der Robustheit bei der Bewegungsbestimmung soll der gesamte 3D-Sensor als in sich statisch definiert sein.

Entgegen Ansätzen wie von Weise et al. in [Wei07] vorgestellt, erfolgen die Vorgänge der Bewegungsdetektion und -kompensation im dreidimensionalen Raum. Eine zweidimensionale Bestimmung von Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$  zwischen verschiedenen Aufnahmezeitpunkten  $n \in T_{\text{Seq}}$  ausschließlich innerhalb der zweidimensionalen Bildebene einer Kamera schränkt die Menge möglicher Bewegungsformen ein. In Gruppen von Algorithmen gegliedert, umfasst die Arbeit folgende drei Hauptpunkte zur dreidimensionalen Bewegungsdetektion und -kompensation:

1. Bestimmung von  $n$  3D-Punktwolken  $\{O_k\}$  des Messobjektes  $\mathbb{O}$  durch Analyse zweidimensionaler Bildaufnahmen  $I_n$  im 8-Bit-Grauwertbereich, wobei jeder Aufnahmezeitpunkt  $n \in T_{\text{Seq}}$  zu genau einer 3D-Punktwolke  $\{O_{k,n}\}$  führt

Die Ermittlung dieser 3D-Punktwolken mit der Datengrundlage von ausschließlich einem Aufnahmezeitpunkt  $n$  wird zwingend für die Schätzung der lokalen Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$  im dreidimensionalen Raum, sowie zur Bestimmung des lokalen Phasenschubs  $\Delta\phi_{R_n}$  benötigt. Als Belichtungszeit jeder Einzelaufnahme sollte zum weitgehenden Ausschluss von Bewegung eine hinreichend kurze Zeitspanne gewählt werden. Für die Bestimmung der Einzel-3D-Punktwolken werden die Phasenbilder  $I_n^c$  einer Fourieranalyse in Kombination mit einer Hochpass-Frequenzfilterung unterzogen. Hierbei wird in Abgrenzung zu etablierten Verfahren eine Frequenzanalyse auf Teilbildern mit fester Größe und signifikanter Fensterüberlappung vorgestellt. Ebenso ist eine neue Herangehensweise zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten mit absoluter Lage im Raum detailliert erläutert. Eine ausführliche Gliederung, sowie die Beschreibung notwendiger Eingabe- und erzielter Ausgabedaten lässt sich Abschnitt 3.2 und insbesondere Abbildung 3.4 entnehmen.

2. Ermittlung der globalen Bewegung zwischen verschiedenen 3D-Punktwolken  $\{O_k\}$  aufeinander folgender Aufnahmezeitpunkte  $n$ , mit dem Ergebnis je eines 6D-Bewegungsvektorfeldes  $T_n^{6D}$
3. Rücktransformation der 3D-Punktwolken in die Bildebenen der verwendeten Kameras  $c1$  und  $c2$ , sowie in die Projektorebene

Die Rückprojektion in den Bildebenen ermöglicht bewegungskompensierte Intensitätsbilder  $\overline{I_n^c}$ , bei denen Punktkorrespondenzen wie bei statischer Messsituation über die gesamte Zeitspanne von simultaner Musterprojektion und Bildaufnahme  $T_{\text{Seq}}$  identisch sind. Für die Ermittlung von Feinphasen  $\phi$  ist die Kenntnis des induzierten (lokalen) Phasenschubs  $\Delta\phi_{R_n}$  als Referenz unabdingbar. Im Fall relativer Objektbewegung entspricht dieser nicht mehr dem durch die Projektion induzierten. In Abhängigkeit der 3D-Objektstruktur und Interbildbewegung wird ein Verfahren vorgestellt, welches auf der Basis der in Punkt 1 bestimmten Einzel-3D-Punktwolken lokal für jeden Bildpunkt  $(x, y)$  ermittelt.

Neben der Verwendung etablierter Algorithmen und Verfahren als Grundlage und Referenz, enthält die vorliegende Arbeit folgende Punkte als Neu- oder Weiterentwicklung:

A) Bewegungsdetektion

- 3D-Punktwolkenermittlung basierend auf 2D-Bilddaten mehrerer Ansichten  $I^c$  eines Aufnahmezeitpunktes  $n$ , im Folgenden als „Stereo-Single-Shot-Analyse“ (SSSA) bezeichnet
- Vorgehen zur  $2\pi$ -Phasenverstetigung ohne Zusatzmuster mit dem Ziel der Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten mit absoluter Position im Raum

B) Bewegungskompensation

- lokale Bestimmung des Phasenschubs  $\Delta\phi_{R_n}$  durch Rückprojektion von 3D-Daten verschiedener Aufnahmezeitpunkte in die Projektorebene
- datengetrieben lokale Bestimmung der Beleuchtungsparameter  $a_n^c$  und  $b_n^c$
- Weiterentwicklung des generalisierten Interferometrie-Verfahrens mit Phasenschieben von Farrell und Player [Far92] zur Nutzung lokaler Phasenschubwerte  $\Delta\phi_{R_n}(x, y)$ , sowie variabler, lokaler Beleuchtungsparameter  $a_n^c(x, y)$  und  $b_n^c(x, y)$

Zusammenfassend stellt die Herangehensweise der Bewegungsbestimmung im dreidimensionalen Raum und der darauf basierenden Bewegungskompensation einen neuen Ansatz zur dynamischen, dreidimensionalen Vermessung makroskopischer Objekte mit aktiver Musterprojektion in  $(1 + \cos)$ -Form dar. Das Vorgehen basiert ausschließlich auf einer algorithmischen Neu- und Weiterentwicklung, wozu keine Anpassungen bestehender Hardwarekomponenten benötigt werden.

## 1.3 Gliederung der Arbeit

Im Folgenden soll die inhaltliche Gliederung dieser Arbeit kurz beschrieben werden.

Der Einführung mit der Einordnung der Arbeit im Bereich der optischen 3D-Messtechnik und einer Darstellung der Notwendigkeit von Messabläufen in dynamischen Szenarien schließt sich mit Kapitel 2 eine Übersicht alternativer Ansätze und Verfahren zur Ermöglichung von 3D-Messen in Bewegung an. Dabei wird im Besonderen auf die Verkürzung der Zeitspanne für Musterprojektion und simultane Bildaufnahme  $T_{\text{seq}}$  durch Reduktion der Anzahl paarweise verschiedener Projektionsmuster (Abschnitt 2.2), sowie die Verwendung signifikant schnellerer Hardwarekomponenten eingegangen (Abschnitt 2.3). Die Reduzierung der Musteranzahl wird, wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, einerseits durch geometrische Einschränkungen oder Nutzung von Vorabwissen erzielt, andererseits eine Verschlechterung des Messergebnisses für die Möglichkeit der dynamischen Messung akzeptiert (Abschnitt 2.2.2).

Kapitel 3 stellt die theoretischen Grundlagen des Hauptbeitrages dieser Arbeit dar. Dabei erfolgt eine Unterteilung in die Punkte der Bewegungsdetektion, der Bewegungskompensation, sowie Grenzen der vorgestellten Verfahren. Für die Detektion von Relativbewegung liegt neben der Bestimmung von 6D-Bewegungsvektorfeldern  $T^{6D}$  der Fokus auf Verfahren zur Ermittlung sogenannter grober 3D-Punktwolken als Analyseresultat jeweils eines Aufnahmezeitpunktes in Abschnitt 3.2.1. Neben Modifikationen etablierter Verfahren zur globalen und fensterbasierten Frequenzanalyse mittels Fouriertransformation, wird in Abschnitt 3.2.1.4 der selbst entwickelte Ansatz der „Stereo-Single-Shot-Analyse“ detailliert beschrieben. Abschnitt 3.2.1.5 beschreibt ein

neu entwickeltes Vorgehen der Phasenverstärkung zur Bestimmung von 3D-Daten mit absoluter Position im Raum. Der Bereich der Bewegungskompensation fokussiert die Abhängigkeiten zwischen lokalem Phasenschub und dem 3D-Profil des Messobjektes, sowie die durch Relativbewegung induzierte Modulations- und im Allgemeinen lokale Beleuchtungsänderung der Objektoberfläche. Den theoretisch-algorithmischen Teil abschließend werden in Abschnitt 3.4 Grenzen der Bewegungskompensation aufgezeigt und in Abschnitt 3.5 eine Abgrenzung zwischen strukturfesten und deformierbaren Objektoberflächen getroffen.

Ergebnisse vorgestellter Algorithmen und Verfahren werden in den Kapitel 4 und 5 vorgestellt. Dabei wird zunächst eine Einschränkung auf Simulationen vorgenommen, anhand derer der Einfluss einzelner Parameter durch gezielte Variation unter Beibehaltung weiterer Randbedingungen aufgezeigt wird. Abschnitt 4.3 liefert einen Vergleich der Ansätze global, fenster- und stereokamerabasiert bei der Gewinnung von 3D-Punktwolken aus zweidimensionalen Bilddaten eines Aufnahmezeitpunktes. Vor- und Nachteile mehrerer selbstentwickelter Ansätze zur datengetriebenen, lokalen Beleuchtungsbestimmung werden in Abschnitt 4.5 aufgezeigt. Abschnitt 4.6 fasst alle möglichen Fehlerquellen des Prozesses der Bewegungskompensation zusammen und zeigt den Einfluss einzelner Prozessabschnitte detailliert auf. In Abschnitt 4.7 findet ein Vergleich zwischen statischen Messsetups, Verfahren des automatischen Zusammensetzens von Einzelergebnissen, sogenannten „Matching“-Verfahren, und der in dieser Arbeit im Fokus stehenden Bewegungskompensation statt.

Kapitel 5 bestätigt die durch Simulationen gewonnenen Ergebnisse durch Anwendung des Gesamtverfahrens aus Bewegungsdetektion und -kompensation anhand eines etablierten 3D-Sensorsystemen, dem hochpräzisen Tischdigitalisierer „kolibri hiScanp“ inklusive zum Vergleich der ermittelten 6D-Bewegungsvektoren existierender Ground-Truth-Bewegung. Hierzu wird das System und die Anwendung findenden Messsetups näher beschrieben, sowie vollautomatisch gewonnene Ergebnisse tabellarisch und grafisch dargestellt. Parametrierend kommt eine Vielzahl in Material, Oberflächenbeschaffenheit und 3D-Struktur signifikant verschiedener Messobjekte in Verbindung mit unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten zum Einsatz.

Eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit wird in Kapitel 6 gegeben. Der Ausblick im zweiten Teil des Kapitels 6 beschäftigt sich neben Optimierungsmöglichkeiten vorgestellter Ansätze mit der Anwendung und möglichen Weiterentwicklungen zur präzisen Rundumvermessung komplexer Objekte, sowie Modifikationen zur Anwendbarkeit auf deformierbare Körper.

## Kapitel 2

### Dynamische 3D-Vermessung: Stand der Technik

**A**bschnitt 1.1 im vorangegangenen Kapitel beschreibt auftretende Probleme und zu lösende Herausforderungen von Messsituationen, bei denen aus Gründen der Machbarkeit oder auch auf Effizienzbasis keine Gewinnung dreidimensionaler Objektkoordinaten durch eine statische Messung ausschließlich mithilfe optischer Komponenten möglich ist. Der damit verbundene Zwang der Realisierung von Messmethoden unter Bewegung ist unumgänglich. Dabei lässt sich der Grundansatz der Reduktion von durch Bewegung hervorgerufene Bildunschärfe eines klassischen Fotos durch (signifikante) Verringerung der Belichtungszeit auf die 3D-Messtechnik übertragen. Äquivalent zur Belichtungszeit eines Fotos ist die Zeitspanne von Musterprojektion und simultaner Bildaufnahme für ein dreidimensionales Messergebnis in seiner Gesamtheit  $T_{\text{Seq}}$ . Die hierzu möglichen Herangehensweisen inklusive rot markiert möglicher Einschränkungen sind in der Übersicht in Abbildung 2.1 benannt, sowie in den folgenden Abschnitten erläutert und diskutiert.

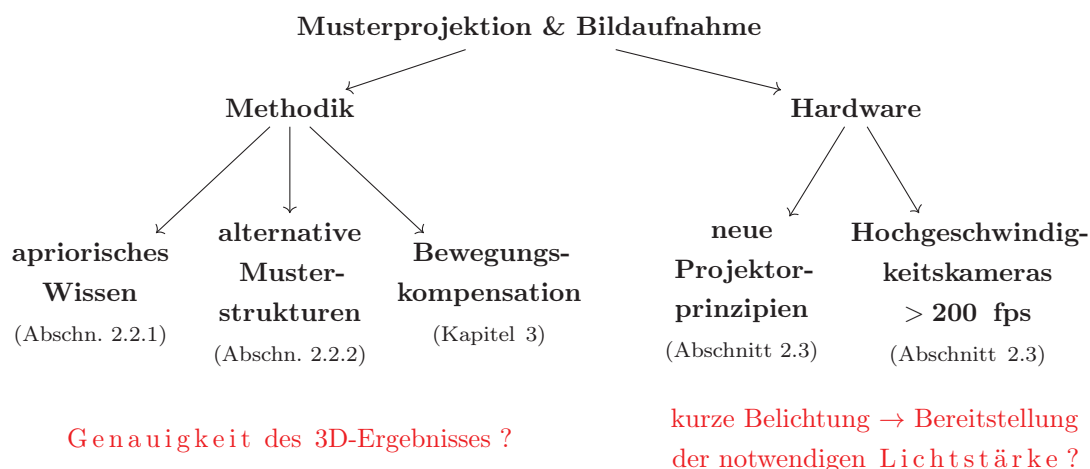


Abbildung 2.1: Übersicht verschiedener Ansätze und Methoden zur Verringerung der Gesamtzeit von Musterprojektion und Bildaufnahme einer dreidimensionalen Objektvermessung  $T_{\text{Seq}}$ . Durch rote Schrift hervorgehoben sind mögliche Einschränkungen und Unterschiede zu den in Kapitel 1 vorgestellten Verfahren.

Die Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2 beschreiben dabei Teile des methodischen Zweigs, wobei der Fokus auf dem Ansatz der Bewegungskompensation im dreidimensionalen Raum liegt und ausführlich in Kapitel 3 erläutert wird. Alternativ werden die Möglichkeiten durch Hardwarebeschleunigung im Abschnitt 2.3 dargestellt und kritisch beleuchtet.



## 2.1 Bewegungskompensation mithilfe alternativer Musterstrukturen

Dem Bewegung innerhalb der Bildebene kompensierenden Ansatz von Gumhold und König [Gum08] liegt eine Bewegungsschätzung auf in die 2D-Bildebene abgebildeter Objekttextur zugrunde. Induziert durch den Phasenschub zwischen je zwei aufeinander folgenden  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen, ist eine merkmalsbasierte Bestimmung von Bewegungsvektoren  $\tau^{2D}$  anhand von Grauwertveränderungen nicht möglich. Gumhold und König erweitern aus diesem Grund die zur dreidimensionalen Objektvermessung notwendige Sequenz paarweise verschiedener Projektionsmuster um sogenannte „Verfolgungsmuster“  $P_T$ . Da diese Muster in dynamischen Messszenarien teilweise Beleuchtungsvariationen unterliegen, erfolgt des Weiteren eine Intensitätsnormierung mit der Verwendung von Hell- und Dunkelbildern, in [Gum08] als An- sowie Aus-Referenzmuster  $P_{on}$  und  $P_{off}$  bezeichnet. Als zu projizierende Mustersequenz ergibt sich damit

$$P_{on}, P_T, P_1, P_{off}, P_T, P_2, \dots, P_{on}, P_T, P_n, P_{off}$$

mit  $n$   $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen als Informationsträger der dreidimensionalen Koordinatenbestimmung. Das Verfahren liefert eine zuverlässige Bewegungsschätzung auf zweidimensionaler Ebene und ermöglicht laut Aussage der Autoren damit ein Objektvermessung auch bei „schneller Bewegung“. Nachteilig ist die signifikante Steigerung der Anzahl notwendiger Projektionsmuster pro Messsequenz zu benennen, welche die Zeit der Projektion und Bildaufnahme  $T_{Seq}$  stark verlängert.

Auf dem entgegengesetzt minimalen Projektionssequenzen von genau einem Bild basiert der „Flying Triangulation“ genannte Ansatz, der 2009 erstmals von Ettl et al. in [Ett09] beschrieben wird. Zum Ausschluss von Bewegung während der Messung wird ein aus Streifen im Grauwertbereich bestehendes Muster in den Messraum projiziert und die Objekt induzierte Deformation dessen zwischen Kamera- und Projektorebene triangulierend ausgewertet. Das dabei bestimmte grobe und unvollständige 3D-Ergebnis frei von Bewegungsartefakten lässt sich im Anschluss durch Verknüpfung mit weiteren durch Einzelansichten gewonnenen 3D-Ergebnissen vervollständigen. Das dreidimensionale Gesamtergebnis basiert also auf der Aufnahme einer Art 3D-Video, wobei dessen Länge für die Vollständigkeit des Endergebnisses entscheidend ist. Die zur Registrierung der Einzelergebnisse zwingend notwendige, präzise Systemkalibrierung wird durch den von Schröter et al. [Sch12] vorgestellten Ansatz ermöglicht, sowie gegenüber bestehenden Verfahren beschleunigt und in der Anzahl notwendiger Nutzerinteraktionen reduziert. Willomitzer et al. zeigen in [Wil11] die Option der Kombination von dreidimensionaler Objektkoordinaten mit Farbtexturinformationen, sowie Grenzen des Ansatzes „Flying Triangulation“ auf, welche durch die geringe Anzahl unterscheidbarer Streifen innerhalb eines Projektionsmusters in der Ergebnisdichte liegen. Eine vollständige Objektrekonstruktion mit dichter 3D-Punktwolke wird ausschließlich durch Messsequenzen mit mehreren hundert Einzelbildern ermöglicht, während dieser Zeit keine Deformation des Messobjektes stattfinden darf.

## 2.2 Verwendung verkürzter Messsequenzen

Neben der Herangehensweise der Kompensation existierender Bewegung, stellt die Minimierung von Bewegung während  $T_{Seq}$  einen alternativen Grundansatz dar. Diese Minimierung lässt sich neben Beschränkungen von Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit durch signifikante Verkür-



zung von  $T_{\text{Seq}}$  erzielen. Werden in der Betrachtung alle hardwareseitigen Parameter, wie die maximale Projektions- und Aufnahmegeschwindigkeit beibehalten, muss die Reduktion über eine Verringerung der Anzahl verwendeter, paarweise disjunkter Musterprojektionen erfolgen. Dabei sollen die Ergebnisparameter, wie Messgenauigkeit, Auswertegeschwindigkeit, sowie Allgemeingültigkeit bezüglich der Messobjekte gegenüber der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Messsequenz mit 48 Einzelmustern pro Sequenz möglichst beibehalten werden. Während mit der sogenannten Epipolargeometrie in Abschnitt 2.2.1 ein geometrischer Ansatz beschrieben wird, der die Weiterverwendung von  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen und Gray-Code-Mustern zur Periodencodierung ermöglicht, sind in Abschnitt 2.2.2 sowie dem Übersichtsartikel von Zhang [Zha12] verschiedene Ansätze zur Farbcodierung und Verwendung alternativer Muster benannt.

### 2.2.1 Anwendung von Epipolargeometrie bei der Korrespondenzsuche von 2D-Bildpunkten

Der nachfolgende Abschnitt 2.2.1.1 zeigt mit der *Epipolargeometrie* eine Möglichkeit auf, ausschließlich durch Nutzung bekannter oder durch unter anderem in [Bro71], [Zha00], [Sch00], [Hu03] und [BB11b] beschriebenen Möglichkeiten zur Bestimmung geometrischer Eigenschaften eines Systems die Anzahl zur dreidimensionalen Objektvermessung notwendiger Projektionsmuster signifikant zu verringern – unter der konkreten Ausgangssituation von zwei um 90 Grad zueinander rotierten Projektionsrichtungen nahezu zu halbieren.

#### 2.2.1.1 Grundprinzip und Anwendung für die 3D-Objektvermessung

Der Epipolargeometrie liegt die Kenntnis der extrinsischen und intrinsischen Kamera- beziehungsweise Systemparameter zugrunde. Zu den extrinsischen Parametern zählt unter anderem die Anordnung der verwendeten Kameras zueinander. Als intrinsisch werden Parameter bezeichnet, die beispielsweise die Kammerkonstante und Lage der optischen Zentren der Kameras  $o^{c1}$  und  $o^{c2}$  beschreiben. Damit ist die Triangulationsbasis, der Abstand zwischen den beiden optischen Kamerazentren des verwendeten 3D-Sensorsystems als bekannt anzusehen. Mit dieser Annahme, der Bekanntheit der Komponentenanzahl im System, lässt sich der grundsätzlich gegebene, in Abbildung 2.2 hellgelb markierte 2D-Suchraum zur Korrespondenzfindung signifikant einschränken.

Dazu sei ohne Beschränkung der Allgemeinheit ein Sehstrahl  $r_k$  ausgehend vom optischen Zentrum der Kamera  $c1$  auf das zu vermessende Objekt betrachtet. Der dabei beobachtete Objektpunkt  $O_k$  des Weltkoordinatensystems wird auf den Punkt  $(x(O_k), y(O_k))$  in der Bildebene von Kamera  $c1$  abgebildet. Die Abbildungs- oder Projektionsvorschrift ist dabei durch Kenntnis der Systemanordnung, der Epipolargeometrie in Form der sogenannten Fundamentalmatrix  $F$  gegeben [Har04, Kapitel 9]. Diese Matrix beschreibt auch die Abbildung desselben Objektpunktes  $O_k$  in die Bildebene der zweiten Kamera  $c2$ . Damit ist die Punktzuordnung zwischen den Kamerabildern  $I^{c1}$  und  $I^{c2}$  allerdings noch nicht eindeutig. Es liegt kein Wissen über den konkreten Abstand zwischen den Kameras und dem Messobjekt vor, damit ist der Richtungsvektor des Sehstrahls ausgehend vom optischen Zentrum der zweiten Kamera  $r_{k,c2}$  nicht determiniert. Betrachtet man den ausgewählten Sehstrahl von Kamera 1  $r_{k,c1}$  als fix und die Entfernung des Messobjektes als unbekannt, so ergibt sich mit Kenntnis der Triangulationsbasis die sogenannte Epipolarebene. Der Schnitt dieser Ebene mit der Bildebene von Kamera  $c2$  ist eine Gerade, die sogenannte Epipolarlinie [Har04, Kapitel 9]. Dadurch werden alle möglichen Kandidaten für die

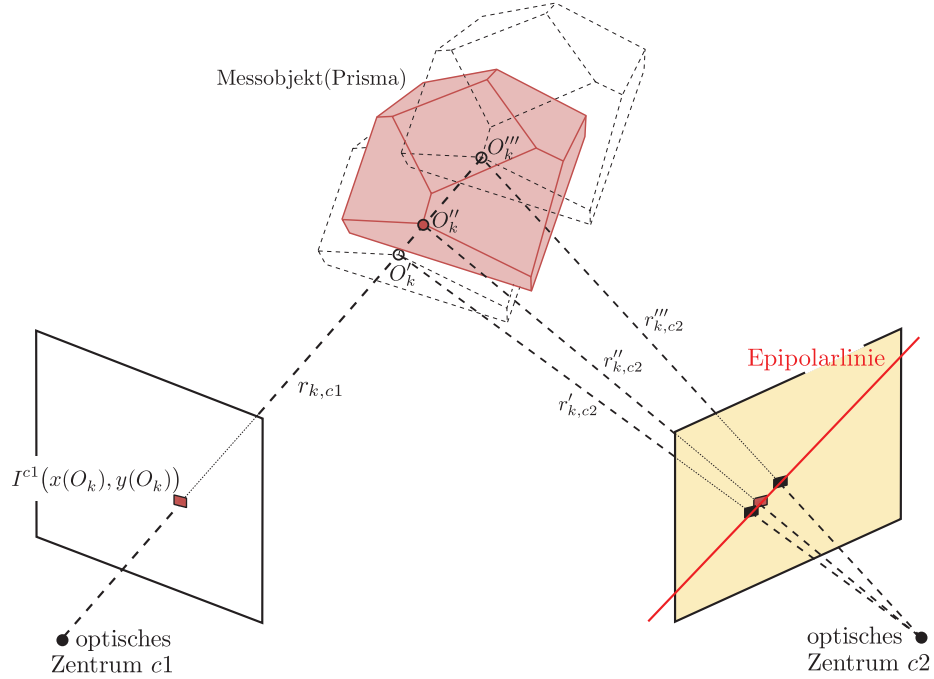


Abbildung 2.2: Verringerung des Suchraums für 2D-Punktkorrespondenzen von einer zweidimensionalen Ebene (hellgelb markiert) auf eine eindimensionale Gerade, die sogenannte Epipolarlinie (rot), durch Kenntnis der in der Systemkalibrierung zusammengefassten extrinsischen sowie intrinsischen Kameraparameter.

Korrespondenz zum gewählten Bildpunkt aus Kamerabild  $I^{c1}$  beschrieben. Die direkte Suche nach dem zuzuordnenden Bildpunkt beschränkt sich damit auf einen eindimensionalen Raum, die in Abbildung 2.2 rot gekennzeichnete Epipolarlinie.

Die in Abschnitt 1.1 beschriebene Notwendigkeit einer zweiten Projektionsrichtung der zur dreidimensionalen Objektvermessung gewählten Muster als temporäre Textur – im konkreten Fall  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen und Gray-Code-Muster – entfällt mit der Suchraumeinschränkung durch die Epipolargeometrie. Die Anzahl der zu projizierenden Muster einer Messsequenz verringert sich damit signifikant von 48 auf 25, unter der Annahme von 16  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen, sieben Gray-Code-Mustern und unter Beibehaltung der Projektion des jeweiligen, sogenannten Hell- und Dunkelbildes [Bre11b]. Neben dieser nahezu Halbierung der Projektions- und Aufnahmezeit einer Messsequenz  $T_{\text{Seq}}$  ergibt sich eine deutliche Beschleunigung der nachgelagerten Auswertung. Der in Abschnitt 1.1 vorgestellte Ansatz der Korrespondenzfindung ohne Kenntnis der Systemanordnung besitzt eine Komplexität von  $\mathcal{O}((M \cdot N)^2)$  beziehungsweise  $\mathcal{O}(N^4)$  mit  $N \geq M$ , wobei mit  $N$  und  $M$  jeweils die Punktzahl der einzelnen Richtungen der zwei betrachteten Kamerabilder  $I^{c1}$  und  $I^{c2}$  bezeichnet ist. Mit Nutzung der Epipolargeometrie verringert sich diese Komplexität für jedes betrachtete Bildpaar auf  $\mathcal{O}(\sqrt{2} \cdot N \cdot M \cdot N) = \mathcal{O}(N^3)$  [Bre11b].

Als zusätzliche Beschleunigung in der Berechnung aller Daten einer Messsequenz bietet sich die Bestimmung der Epipolarlinien für alle  $(N \cdot M)$  Bildpunkte mit ganzzahligen Koordinaten der ohne Beschränkung der Allgemeinheit als Master angesehenen Kamera  $c1$  an. Da die Systemanordnung für jede Messsequenz als fix und damit die zugehörige Epipolargeometrie als unveränderlich angesehen werden können, ist eine Berechnung der Epipolarlinien offline, das heißt bereits vor dem eigentlichen Start der ersten dreidimensionalen Objektvermessung möglich.

### 2.2.1.2 Verwendung von apriorischem Wissen

In diesem Abschnitt soll beschrieben werden, inwieweit apriorisches Wissen über das Messobjekt zur weiteren Einschränkung des Suchraums zweidimensionaler Punktkorrespondenzen zwischen Kamerabildern  $I$  desselben Aufnahmezeitpunktes  $t \in T_{\text{Seq}}$  genutzt werden kann. Dazu soll davon ausgegangen werden, dass das betrachtete Messobjekt eine Beschränkung der Tiefenausdehnung, der im Allgemeinen mit  $Z$  bezeichneten Raumdimension besitzt. Dies ist beispielsweise im Bereich von Inspektionsaufgaben bei Elektronikkomponenten gegeben. Diese Tiefenbeschränkung grenzt damit unter Annahme einer fixen Positionierebene für die Messobjekte die mögliche Entfernung der betrachteten Objektpunkte  $O_k$  zu den Kameras ein. Ist die Epipolarlinie für einen bestimmten Punkt  $(x, y)$  aus Kamerabild  $I^{c1}$  bestimmt, lassen sich mit dem Wissen der Tiefeneinschränkung die Extrema möglicher Entfernung des Messobjektes zu den Kameras festlegen und damit die Epipolarlinie auf einen konkreten Bereich einschränken. Je flacher ein Messobjekt ist, desto kürzer ist das sogenannte Epipolarliniensegment (dick markierte, rote Strecke in Abbildung 2.3), welches für die Korrespondenzfindung betrachtet werden muss [BB10].

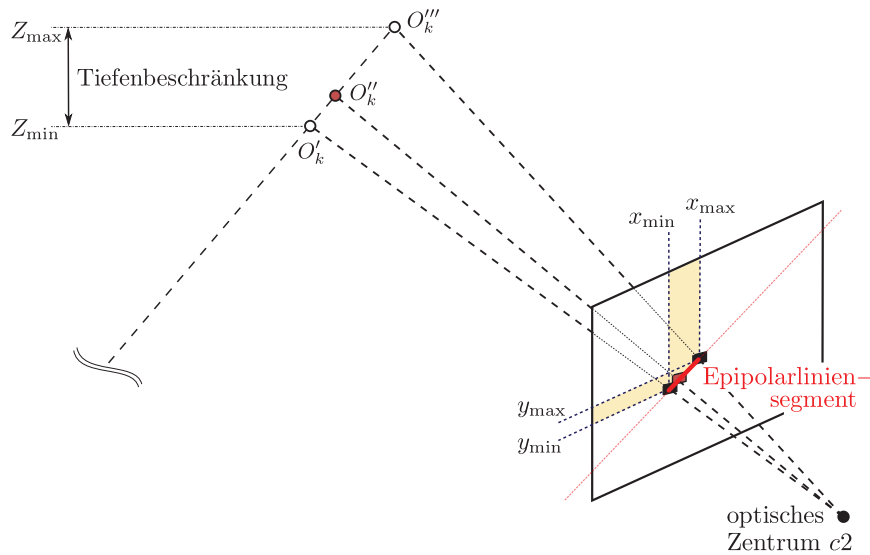


Abbildung 2.3: Zusätzliche Einschränkung des eindimensionalen Suchraums entlang der Epipolarlinie auf ein Segment durch a priori Tiefeninformationen des Messobjektes.

Bisher wurde in den Ausführungen zur Epipolargeometrie von einem optimalen Messsystem ausgegangen und dabei unter anderem Einflüsse von Kamera- und Optikverzeichnungen in der Praxis nicht betrachtet. Im industriellen Einsatz muss unabhängig von der Güte verwendeter Kameras und Objektive die Bildverzeichnung, unabhängig ihrer konkreten Art, mit in die Betrachtung einbezogen werden [Pap96]. Unter der Annahme tiefenbeschränkter Messobjekte und der damit verbundenen Verwendbarkeit von Segmenten von Epipolarlinien ist der Einfluss von Bildverzeichnungen auch im praktischen Anwendungsgebiet vernachlässigbar. Für Segmentlängen von weniger als 5 Prozent der Bildausdehnung ergibt sich bei Verwendung von Optiken im Normal- oder Telebereich eine Verzeichnung im Bereich kleiner 0,01 Pixel über das gesamte Segment [BB10]. Bei dieser minimalen Krümmung des Geradensegmentes kann auf die Verzeichnungsbetrachtung bei der Korrespondenzsuche ohne Genauigkeitsverluste in der dreidimensionalen Objektvermessung verzichtet werden.

### 2.2.2 Reduktion der Anzahl an Musterprojektionen

Neben dem im vorangegangenen Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Ansatz der Nutzung apriorischer Kenntnisse der Geometrie des 3D-Sensorsystems durch die Epipolarometrie und der grundsätzlichen Beibehaltung an Mustercodierungen existiert eine Mehrzahl an Verfahren, die durch alternative Musterstrukturen eine optische und damit berührungslose Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten ermöglicht. Grundsätzlich lassen sich bekannte Verfahren dabei wie folgt kategorisieren:

- beschleunigte Phasenschiebetechniken bei Nutzung von  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen
- Einzelbildverfahren: Farbcodierung, Vereinigungsmuster
- zeitliche Codierung durch Streifenübergänge
- Fourier-Transformations-Profilometrie (FTP)

#### V1 – Zwei-Schritt-Phasenschiebetechnik

Wie in den Abschnitten 1.1 und 3.1 dargestellt, werden zur eindeutigen Lösung von Gleichung (1.1) mindestens  $n = 3$  paarweise disjunkte Intensitätsverteilungen im Messraum benötigt. Eine Reduzierung dessen auf  $n = 2$  mit einem Phasenschub von  $\Delta\phi_{R_n} = \pi/2$  zeigen Yang und He in [Yan07]. Diese Verringerung wird durch Einbeziehung sowohl der Intensitätswerte  $I_n^c$  als auch deren Ableitungen in die Berechnung ermöglicht. Bedingt durch die Eigenschaft der Elimination von Konstanten durch den Ableitungsprozess, entfällt die additive Hintergrundbeleuchtung  $a$ , deren niedrig-frequenter Anteil an der lokalen Bildinformation nach [Yan07] bei der Bestimmung von Rohphasen  $\phi_{\text{rel}} \in [-\pi, \pi)$  vernachlässigt werden kann. Die Eliminierung von  $a$  führt zu einer Abweichung von  $\epsilon(\phi_{\text{rel}}) < 0,33$  rad gegenüber der Verwendung von Messsequenzen einer Länge von  $n = 4$ . Der Abweichung steht im Sinn dynamischer Objektvermessung eine Halbierung der Zeitspanne  $T_{\text{Seq}}$  gegenüber.

Eine alternative Umsetzung der Zwei-Schritt-Phasenschiebetechnik beschreiben Zhang et al. [Zha14b] mit der Verwendung von zwei Wellenlängen, kombiniert in einem Projektionsmuster. Zur eindeutigen Bestimmung beider Phasenverschiebungen werden mindestens zwei der Kombinationsmuster benötigt, wobei beide Wellenlängen eine Phasenverschiebung  $\Delta\phi_{R_n}$  zwischen den Mustern aufweisen müssen. Gegenüber der zuvor erläuterten Methode des Zwei-Schritt-Phasenschiebens mit ausschließlich einer Wellenlänge ergeben sich Genauigkeitsvorteile aufgrund des größeren Informationsgehaltes, sowie zusätzlich die Möglichkeit der  $2\pi$ -Phasenverstetigung ohne Zusatzmuster. Grundsätzlich gilt analog zur Interferometrie mit der Verwendung einer Wellenlänge, dass sich mit steigender Anzahl paarweise verschiedener Projektionsmuster innerhalb einer Messsequenz die Genauigkeit der Bestimmung dreidimensionaler Objektdaten steigern lässt.

#### V2– Drei-Schritt-Phasenschiebetechnik mit beschleunigter Musterprojektion

Ebenfalls im Bereich der beschleunigten Phasenschiebetechniken einordnen lassen sich die von Huang et al. in [Hua02], sowie einer Weiterentwicklung dessen von Zhang und Huang in [Zha06b], von Zhang und Yau in [Zha06a] und von Weise et al. in [Wei07] vorgestellten Verfahren. Allen Vorgehensweisen gemeinsam ist die Verwendung einer möglichst geringen Anzahl an Kosinusintensitätsverteilungen.

So verwenden Huang et al. exakt drei jeweils um  $\Delta\phi_{R_n} = 120^\circ$  phasenverschobene  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen. Diese werden über die einzelnen Kanäle R-G-B in einem Farbbild vereint [Hua02] und an den Farbprojektor gesandt. Die Bildaufnahme erfolgt im 8-Bit-Bereich mithilfe einer Grauwertkamera, so dass sich ein Ausbau des vorgelagerten Farbrades im Projektionssystem und damit die Projektion von Grauwertbildern empfiehlt. Die Eigenschaften eines Farbprojektors mit ausgebautem Farbrad ermöglichen die Projektion der drei Intensitätsverteilungen sequenziell innerhalb eines Zyklus. Durch einen externen Microcontroller wird die verwendete Kamera auf die Zeiten der einzelnen Bildkanäle getriggert, so dass pro Messsequenz beziehungsweise Projektionszyklus drei paarweise disjunkte Grauwertverteilungen  $I_1, I_2$  und  $I_3$  zur Bestimmung von Rohphasen vorliegen. Das Ergebnis von 16 dreidimensionalen Objektrekonstruktionen pro Sekunde steigern Zhang und Huang in [Zha06b] durch Verwendung schnellerer Hardware auf  $fps^{3D} = 40$ .

Vergleichbare Geschwindigkeiten erzielen Zhang und Huang 2006 [Zha06a] mit  $fps^{3D} = 30$  unter Verwendung eines Stereokamerasystems. Da die notwendige  $2\pi$ -Verstetigung der Rohphasen  $\phi_{rel}$  ausschließlich bildintern verläuft, muss zwischen den zwei Kameras eine eindeutige Verknüpfung bereitgestellt werden. Dies erfolgt durch zusätzliche „Projektion eines sehr kleinen Markers“ [Zha06a]. Zur Verbesserung der Detektion dessen erfolgt die Überführung der Eingabebilder  $I_n^c$  in eine sogenannte Gamma-Karte. Diese ergibt sich nach Gleichung (2.1) aus der pixelweisen Division von Modulation  $b(x, y)$  und Grundhelligkeit  $a(x, y)$ :

$$\gamma(x, y) = \frac{b(x, y)}{a(x, y)} = \frac{\sqrt{3(I_1^c - I_3^c)^2 + (2 \cdot I_2^c - I_1^c - I_3^c)^2}}{I_1^c + I_2^c + I_3^c} \quad (2.1)$$

Die Nulllage der absoluten Phasenkarte  $\phi_{abs}^c$  wird in jedem Bild durch die Position des Markers definiert. Dies ermöglicht unter Nutzung der in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Epipolargeometrie die phasenbasierte Triangulation innerhalb des Stereokamerasystems.

### V3 – Drei-Schritt-Phasenschiebetechnik mit lokaler Bewegungskompensation

Weise et al. erzielen mithilfe der Verwendung von jeweils drei, sequenziell projizierten  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen pro 3D-Ergebnis eine Rekonstruktionsrate komplexer dynamischer Szenen von  $fps^{3D} = 17$ . Deren Fokus liegt in [Wei07] auf der „Kompensation von Bewegungsartefakten auf Pixelniveau“. Die Grundannahme des Vorgehens ist eine während  $T_{Seq}$  vorherrschende Linearbewegung, sowie die Kenntnis der konkreten Zeitspanne von  $T_{Seq}$ . Hieraus lassen sich unter Kenntnis konkreter Pixelpositionen Distanzvektoren beziehungsweise Bewegungsstrecken  $\Delta s$  und damit die Bewegungsgeschwindigkeit entlang der Oberflächennormale bestimmen. Als weitere Annahmen werden die lokale Oberflächenglattheit, die lokale Konstanz der Grundbeleuchtung  $a$  sowie die Kenntnis der Projektionsrichtung genutzt. Damit lässt sich bei bekannter Phasenverschiebung von  $\Delta\phi_{R_n} = \frac{2\pi}{3}$  aus den Bilddaten  $I_n^c$  die bewegungsbedingte Phasenverschiebung ermitteln und in die Rohphasenbestimmung integrieren. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Reduktion der bewegungsinduzierten Fehler der 3D-Objektkoordinaten in Bezug zu Ground-Truth-Daten um etwa Faktor 4 [Wei07, Figure 5 (c)].

### V4 – Farbbildimplementierung der Drei-Schritt-Phasenschiebetechnik

Vergleichbar mit dem Vorgehen in [Hua02] und [Zha06b] kombinieren Huang et al. [Hua99] ebenfalls drei phasenverschobene  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen in die drei Kanäle rot, grün

und blau eines Farbbildes. Musterprojektion und Bildaufnahme erfolgen im Gegensatz zu den zwei erstgenannten Veröffentlichungen mithilfe des Farbprojektors inklusive Farbrad und Nutzung einer Farbkamera. Damit entspricht die 3D-Bildrate  $f_{ps}^{3D}$  dem Minimum aus Projektions- und Bildaufnahmezeit. Zumeist kann damit der Faktor 3 im Vergleich zur Projektion unter anderem in [Zha06b] notwendigerweise schnelleren Bildaufnahmezeit vernachlässigt beziehungsweise für die Beschleunigung des Gesamtsystems genutzt werden. Als Nachteile ergeben sich verstärkte Einflüsse der Objekttextur und insbesondere Objektfarbe, sowie eine nicht gleichmäßige Ausleuchtung der Farbkanäle. Hierfür ist eine pro Farbkanal getrennte Betrachtung der Kamerakennlinie notwendig, womit Fehler minimiert, aber nicht vollständig kompensierbar sind, da sogenanntes Übersprechen zwischen den einzelnen Farbkanälen mit diesem Vorgehen nicht auflösbar ist.

Eine Kombination aus drei in ihrer Phasenlage zueinander verschobenen  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen, integriert in die drei Farbkanäle eines Projektionsbildes, wird ebenfalls durch Nguyen et al. vorgestellt [Ngu15]. Hierbei liegt der Fokus auf Optimierungen des Grundprinzips durch eine verallgemeinerte Systemanordnung, flexible Kalibriermethoden, einer robusten Gammakorrektur jedes einzelnen Farbbildkanals, sowie durch Grafikkartenunterstützung stark parallelisierte und damit signifikant beschleunigte Phasenbestimmung und  $2\pi$ -Verstetigung. In experimenteller Verifikation wird eine Bildrate dreidimensionaler Ergebnisse von  $f_{ps}^{3D} = 45$  gezeigt.

### V5 – Vereinigungsmuster modulierter $(1 + \cos)$ -Grauwertverteilungen

Ein weiterer Ansatz im Bereich der Einzelbildverfahren wird durch die Anwendung sogenannter Vereinigungsmuster im 8-Bit-Grauwertbereich beschrieben. Hierbei werden wie durch Guan, Hassebrook und Lau in [Gua03a] und [Gua03b] vorgestellt und in Abbildung 2.4 veranschaulicht,  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen jeweils mit einem sogenannten Trägermuster multipliziert. Diese Trägermuster besitzen eine zu den Originalmustern orthogonale Grauwertverteilung und sind hinsichtlich ihrer primären Ortsfrequenz untereinander paarweise weitgehend verschieden. Das

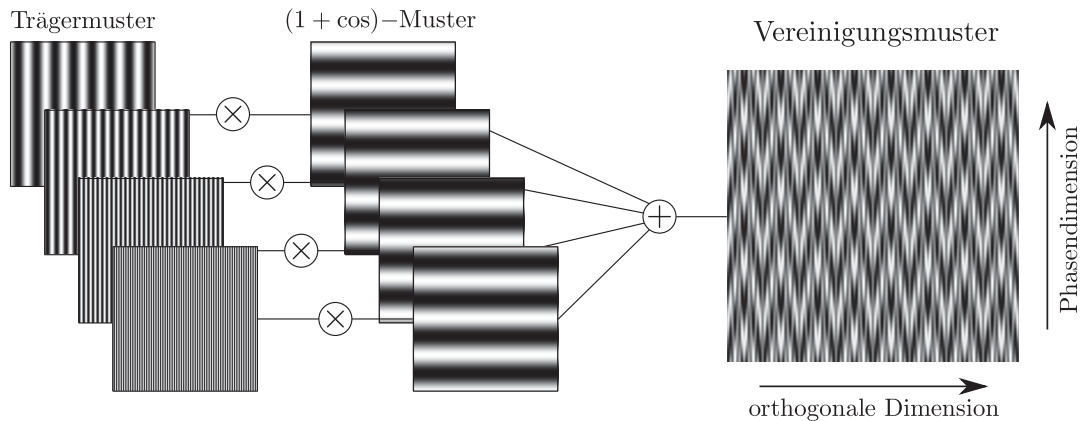


Abbildung 2.4: Art und Vorgehen der Zusammensetzung sogenannter Vereinigungsmuster (ähnlich [Gua03a, Fig. 2]). Hierzu werden  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen orthogonal zur Richtung größter Frequenzen durch Multiplikation mit Trägermustern weitgehend verschiedener Ortsfrequenzen moduliert, sowie im Gesamten addiert. Im konkreten Beispiel besitzen die Trägermuster die Frequenzen  $f_1 = 8$ ,  $f_2 = 16$ ,  $f_3 = 32$  und  $f_4 = 64$ , die  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen eine Frequenz von  $f = 4$ , sowie einen paarweisen Phasenschub von  $\Delta\phi_{R_n} = 90^\circ$ .



Maß dieser Verschiedenheit stellt die Basis zur späteren Trennung des in den Objektraum projizierten und durch mindestens eine Kamera simultan aufgenommenen Vereinigungsmusters dar. Je ähnlicher die Ortsfrequenzen der Trägermuster sind, desto komplexer ist der Vorgang der Separierung.

Die Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten mit absoluter Lage im Raum basierend auf ausschließlich drei paarweise in der Phase verschobener  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen wird durch Lohry et al. [Loh14a] [Loh14b] beschrieben. Zur Realisierung der absoluten Lagebestimmung wird jede  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung mit einem stochastischen Muster im 8-Bit-Grauwertbereich kombiniert, sowie anschließend in eine 1-Bit-Darstellung überführt. Diese Beschränkung der Grauwertunterschiede auf zwei ermöglicht eine signifikant erhöhte Projektionsrate, unter anderem mit den in Abschnitt 2.3 erwähnten Spezialsystem von Texas Instruments. Die Bestimmung relativer Phasenwerte  $\phi_{\text{rel}} \in [-\pi, \pi)$  erfolgt nach sequenzieller Projektion von drei dieser, untereinander paarweise phasenverschobenen 1-Bit-Vereinigungsmuster.

## V6 – Codierung durch Schwarz-Weiß-Streifenübergänge

Ein Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung langsam bewegter Objekte wird grundlegend in [HH01], sowie dessen Anwendung in [Rus02] beschrieben. Als Objektpunkt codierende Intensitätsverteilungen werden dabei im Gegensatz zu bisher vorgestellten Ansätzen keine stetigen Funktionen verwendet. Vielmehr basiert das Verfahren auf schwarz-weiß-Übergängen von Streifen definierter Breite. Die Erzeugung der sogenannten Streifenübergangscodes erfolgt aus Grundlage des vollständigen Graphen aller Binärcodes einer a priori determinierten Länge, der Länge an Mustern pro Messesequenz  $n$ . Innerhalb des Graphen sind jeweils zwei Binärcode repräsentierende Knoten ungerichtet miteinander verbunden, wenn für jede Bitposition mindestens eine zweite Bitposition einem Wechsel unterliegt. Beispielsweise existiert im 4-Bit-Fall eine Kante zwischen 1101 und 0111, eine direkte Verbindung zwischen 0000 und 1111 gibt es nicht. Für die Sequenz zu projizierender Streifenübergangscodes gilt es, den längsten Pfad innerhalb des Graphen zu finden, bei dem jeder Knotenpunkt ausschließlich einmal pro Richtung durchlaufen wird. Weitere Einschränkungen zur Existenz von Kanten im Binärgraphen, sowie Vorschriften zum Erstellen des Binärcodes in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit  $v_{\text{rel}}$  mit oder ohne Hinzunahme sogenannter „ghost boundaries“ können [HH01] entnommen werden. Ein Beispiel mit der Sequenzlänge  $n = 4$  ist in Abbildung 2.5 veranschaulicht.



Abbildung 2.5: Beispiel eines vierstufigen Streifenübergangscodes, das heißt einer Musterprojektion mit Sequenzlänge  $n = 4$  pro dreidimensionaler Objektkoordinatenbestimmung (ähnlich [HH01]).

## V7 – Statistische Grauwertverteilungen im Infrarotbereich

Auf die Projektion statistischer Grauwertverteilungen im für den Menschen nicht sichtbaren Lichtspektrum sind die zwei auf ihre jeweiligen Anwendungsfälle optimierten Produkte „Microsoft Kinect“ [Mic14] und „Mantis Vision MVC-F5 Hand-Held Imager“ [Man12] fokussiert. Die Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten basiert auf der fortlaufenden Variation der Intensitätsverteilungen im Messraum. Mit überschneidender Datengrundlage lassen sich auf diese

Weise fortlaufend 3D-Daten aus einer jeweiligen Mehrzahl an Eingabebildern bestimmen. Angaben zu erzielbaren Genauigkeiten des Kinect-Systems lassen sich den Ausführungen von Khoshelham und Elberink in [Kho12], sowie Galna et al. [Gal14] entnehmen.

## V8 – Fourier-Transformations-Profilometrie (FTP)

Grundlagen, Einschränkungen, sowie Möglichkeiten der Gewinnung dreidimensionaler Objektkoordinaten mithilfe von Ansätzen der erstmals durch Takeda und Mutoh in [Tak83] erwähnten Fourier-Transformations-Profilometrie werden detailliert in den Abschnitten 3.2.1.1 bis 3.2.1.3 dieser Arbeit beschrieben und diskutiert.

Phasensprünge größer  $\pi$  führen in der Interferogrammanalyse zu Fehlern, weshalb die meisten FTP-Verfahren eine Tiefenbeschränkung für Messobjekte besitzen. Modifikation des Grundansatzes und Alternativen zum Umgehen dieses Nachteils werden durch Zappa und Busca in [Zap12], sowie von Muñoz-Maciel et al. in [MM14] vorgestellt. Weitere Einschränkungen zur eindeutigen Phasenbestimmung und daraus abgeleitet Ermittlung der 3D-Objektstruktur sind durch nicht-lineare Kennlinien von Projektion und Bildaufnahme gegeben. Eine Möglichkeit zur Auflösung dieser Problemstellung im Rahmen der Einzelbildanalyse von Interferogrammen ist durch Cao et al. in [Cao14b] und [Cao14a] diskutiert, indem lokale Höhenunterschiede des Messobjektes auf dem Abstand gleicher Intensitätswerte verschiedener  $(1 + \cos)$ -Perioden in der Bildaufnahme  $I$  bestimmt und mithilfe bekannter Sensorgeometrie in Höhendifferenzen konvertiert werden. Eine alternative Möglichkeit zur Korrektur von Einflüssen der Objektoberfläche beschreibt Sakuma [Sak13] mit der Auswertung einer  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung im 24-Bit-Farbbereich. Eine Kombination aus einer 8-Bit-Grauwertverteilung in  $(1 + \cos)$ -Form mit einer Farbcodierung der Perioden zur späteren  $2\pi$ -Verstetigung stellen Zhang et al. in [Zha14a] vor.

Tabelle 2.1 zeigt zusammenfassend existierende Vor- und Nachteile der genannten Verfahren zur beschleunigten dreidimensionalen Vermessung makroskopischer Objekte unter Verwendung einer begrenzten Anzahl paarweise disjunkter Mustercodierungen pro Messsequenz auf.

Tabelle 2.1: Übersicht über Vor- und Nachteile benannter Verfahren zur Reduktion der Anzahl an Musterprojektionen V1 bis V8.

Methode	Vorteile	Nachteile
V1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nur zwei <math>(1 + \cos)</math>-Muster notwendig</li> <li>• Mehrwellenlängen: <math>2\pi</math>-Verstetigung ohne Zusatzmuster</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Phasenfehler (bis zu 0,33 rad)</li> <li>• Mehrwellenlängen: Realisierung von Projektion aufwendiger</li> </ul>
V2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>fps^{3D}</math> = Projektionsrate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassungen am Projektionssystem</li> </ul>
V3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lokale Bewegungskompensation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Annahme lokal linearer Bewegung</li> </ul>
V4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>fps^{3D}</math> = Projektions- &amp; Bildrate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abhängigkeit von Objektfarbe</li> <li>• Übersprechen von Farbkanälen</li> </ul>
V5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>fps^{3D}</math> = Projektions- &amp; Bildrate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr hohe Ortsfrequenzen</li> <li>• geringe laterale Auflösung</li> </ul>
V6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompensation kleiner Bewegung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• begrenzte laterale Auflösung</li> </ul>
V7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Echtzeit-Projektion &amp; -Auswertung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe laterale Auflösung</li> </ul>
V8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>fps^{3D}</math> = Projektions- &amp; Bildrate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einschränkungen für Objektiefe</li> </ul>



## 2.3 Bereitstellung eines quasi-statischen Messsetups durch Nutzung von Hochgeschwindigkeits-Hardware

Die Bereitstellung eines *quasi-statischen Messsetups* mit Nutzung einer Mehrzahl an temporär auf das Messobjekt projizierten Intensitätsverteilungen kann ausschließlich durch Modifikationen im Hardwarebereich erfolgen. Von einem quasi-statischen Messsetup wird gesprochen, wenn während der Zeit von Musterprojektion und simultaner Bildaufnahme  $T_{\text{Seq}}$  keine oder eine für die weitere Datenverarbeitung vernachlässigbar kleine Relativbewegung  $v_{\text{rel}} \approx 0$  zwischen den Komponenten des 3D-Sensors und dem Messobjekt existiert.

$$\min \left( T_{\text{Seq}} = |n| \cdot \frac{1}{fps} \right) \quad (2.2)$$

Dabei steht *fps* generalisiert sowohl für die Projektionsrate, mit der im Messraum paarweise disjunkte Intensitätsverteilungen abgebildet werden, als auch die Anzahl an 2D-Bildaufnahmen pro Sekunde. Die Beschränkung auf einen Parameter ist zulässig, da ausschließlich die Anzahl simultan projizierter und aufgenommener Bilder Informationen zur dreidimensionalen Rekonstruktion von Objekten liefern. Dabei ist für *fps* das Minimum aus aktiver Projektions- und Bildaufnahme rate maßgebend.

Eine Minimierung von  $T_{\text{Seq}}$  bei gleichbleibender Anzahl paarweise disjunkter Intensitätsverteilungen  $|n|$  lässt sich nach Gleichung (2.2) ausschließlich über eine Erhöhung der Projektions- und Bildaufnahme rate *fps* erzielen. Hierbei gilt es die einzelnen Hardwarekomponenten, das Projektionssystem auf der einen Seite und die verwendete Kameratechnik auf der anderen Seite getrennt zu betrachten. Für Letztgenanntes, die Kamerahardware, ist in den vergangenen Jahren eine starke Entwicklung im Geschwindigkeitsbereich zu verzeichnen. Ausschließlich für einen 3D-Sensor einschränkend durch gegebenenfalls begrenzt vorhandenen Bauraum oder durch ein Maximum im Kostenbereich sind Kamerasensoren mit Bildaufnahme rates von bis zu zwei Megahertz, das heißt zwei Millionen Bilder pro Sekunde verfügbar. Beispielhaft seien an dieser Stelle und in Tabelle 2.3 die „MotionPro Y7-S3“ von IDT [Ima14], die „pco.dimax HS4“ [PCO14], die „Photron Fastcam SA-Z“ [Pho14], sowie die „VisionResearch Phantom v2511“ [Vis14] ohne Anspruch auf Vollständigkeit oder eine gewichtete Reihenfolge zu nennen. Zumeist werden die Bilddaten in einem internen Speicher abgelegt und nachgelagert an ein Rechensystem übertragen. Dies stellt

Tabelle 2.3: Beispielhafte Hochgeschwindigkeitskameras mit jeweiligem Zusammenhang von Bildpunktanzahl  $px$  und Bildaufnahme rate *fps*. Pro Kamera ist jeweils in der oberen Zeile die größtmögliche Bildpunktanzahl benannt, die jeweils untere Zeile spiegelt die maximale Bildaufnahme rate wider.

Hersteller	Bezeichnung	Bildpunktanzahl	Bildaufnahme rate
Imaging Solutions GmbH	MotionPro Y7-S3	$1.920 \times 1.080$	12.300
		$1.920 \times 16$	300.000
PCO AG	dimax HS4	$2.000 \times 2.000$	2.277
		$320 \times 200$	46.746
Photron Inc. / VKT GmbH	FastCam SA-Z	$1.024 \times 1.024$	20.000
		$128 \times 8$	2.100.000
Vision Research Inc.	Phantom v2511	$1.280 \times 800$	25.600
		$128 \times 16$	1.000.000

für die quasi-statische Messsituation allerdings keine Einschränkung dar, da für  $T_{\text{Seq}}$  ausschließlich die Zeitspanne der Datenakquise entscheidend ist. Abhängig von  $v_{\text{rel}}$  ist bildaufnahmeseitig ausschließlich einschränkend durch Bauraum, Systemkosten und notwendiger Pixelanzahl pro Bild immer ein Kamerasystem zur Minimierung von  $T_{\text{Seq}}$  gegeben.

Hardwareseitig größere Beschränkungen sind durch die Geschwindigkeit der Mustervariation existierender Projektionssysteme basierend auf DMD-, DLP- oder LCoS-Technologie gegeben, die unter Verwendung digitaler Mikrodisplays ihr Maximum bei 75 Farbbildern pro Sekunde besitzen. Für die hinreichende Projektion von Intensitätsverteilungen im 8-Bit-Grauwertbereich  $[0, 255]$  empfiehlt sich die Modifikation der Farbrad-Auslassung, sodass eine Mustervariation systembedingt von 180 Bildern beim LCoS-Mikrodisplay von Holoeye [HOL14a] und prinzipiell nach Huang et al. [Hua02] bis zu 225 Bildern möglich ist. Einzelne, von Texas Instruments auf spezielle Anwendungen optimierte Systeme liefern einen Bildwechsel von maximal 250 [Tex14] Wechseln der 8-Bit-Intensitätsverteilung pro Sekunde. Eine Äquivalenz zu benannten Möglichkeiten der Kamerasysteme ergibt sich damit nicht, so dass der limitierende Faktor des Parameters  $fps$  im Bereich kommerziell verfügbarer Projektionssysteme liegt.

In den folgenden zwei Unterabschnitten 2.3.1 und 2.3.2 sollen daher kurz zwei Forschungsprojekte beschrieben sein, die diese Einschränkung der maximal möglichen Projektionsrate prinzipiell aufheben.

### 2.3.1 LED-Arrayprojektion

Grundsätzlich gilt für Hochgeschwindigkeitsprojektionen und -aufnahmen, dass jedes einzelne Muster ausschließlich eine Belichtungszeit von wenigen Mikro- bis Millisekunden besitzt. Trotz dieser zeitlich sehr kurzen Projektionen muss eine ausreichend hohe Beleuchtungsstärke im Objektraum vorhanden sein, da die Messergebnisse nicht nur eine Abhängigkeit zur Anzahl verwendeter Muster  $N \equiv |n|$  innerhalb einer Messsequenz, sondern auch deren Grauwertmodulation  $b$  und Maximalintensität  $\max(I_n)$  besitzen. Nicht zuletzt ist gerade im Bereich dynamischer Objektvermessungen eine Verwendung in mobilen Messsystemen wünschenswert, weshalb auch ein Augenmerk auf der Baugröße liegt.

Die Erfüllung der erwähnten drei Ansprüche gewährleistet unter anderem ein der Natur nachempfunder Aufbau analog dem der Facettenaugen von Insekten. Dabei sind eine Vielzahl an LED in einem zweidimensionalen Array angeordnet und lassen sich computergesteuert aktivieren und deaktivieren [Sie10]. Dieses Ein- und Ausschalten erfolgt abhängig von der Wahl konkreter LED im Kilohertzbereich, teilweise bis in den unteren Megahertzbereich hinein und damit zu benannten Kameraschwindigkeiten entsprechend. Im Folgenden soll ein konkreter, im Fraunhofer IOF entwickelter Prototyp eines 3D-Messsystems mit sogenannter Arrayprojektion näher beschrieben werden.

Der als solches bezeichnete *3D-Arrayprojektor* besteht im Gegensatz zu Einkanalprojektoren aus mehreren, zweidimensional zueinander angeordneten Projektionskanälen [Bre12c]. Diese werden als Projektionseinheit bezeichnet und beschreiben das kleinste Element im Aufbau (Gliederungsübersicht in Abbildung 2.6 (a), sowie hellgrüne Kästen in Abbildung 2.6 (b)). Eine Projektionseinheit besteht in Durchleuchtungsrichtung – in Abbildung 2.6 (b) von links nach rechts – aus einer Sammellinse, einer Objektstruktur (rote Rechtecke) und einer Projektionsoptik. Jede einzelne Projektionseinheit projiziert ein Teilmuster in voller lateraler Ausdehnung der final entstehenden Projektion in den Objektraum.

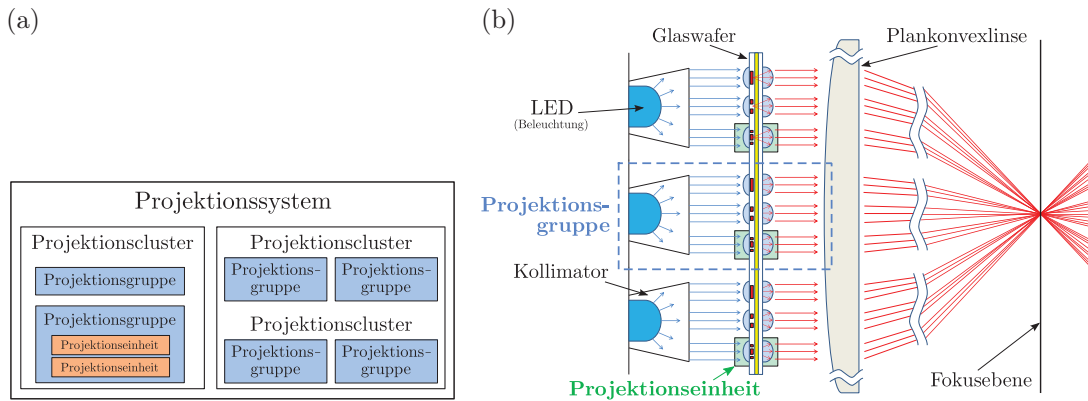


Abbildung 2.6: (a) Veranschaulichung einzelner Gliederungsebenen innerhalb eines Arrayprojektionssystems [Bre12c]. (b) Strahlengänge innerhalb eines Arrayprojektionssystems zur Abbildung verschiedener Intensitätsverteilungen in ein vordefiniertes Messvolumen [Bre12a].

Die in [Bre12c] definierten „resultierenden Muster“, beispielsweise  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen [Hei13a] oder deren in Amplitude und Phase modulierten Äquivalente, die sogenannten bandbegrenzt aperiodischen Streifenmuster [Hei14] (Abbildung 2.7 (a)), ergeben sich aus der Überlagerung mehrerer, teilweise verschiedener Teilmuster im Objektraum. So ist die Kosinusfunktion durch mehrere Rechteckfunktionen diskretisiert. Die Überlagerung in der gewünschten Messentfernung wird durch eine Plankonvexlinse, welche in Durchleuchtungsrichtung hinter den Projektionsoptiken angebracht ist, realisiert. Alternativ lassen sich die Sammellinsen und Projektionsoptiken in Durchleuchtungsrichtung leicht versetzt anordnen und durch diese Art von „Schielen“ eine Überlagerung von Teilmustern im Objektraum realisieren [Sie10, Fig. 2]. Einschränkung gilt, dass dieses Schielen, abhängig von der flächenhaften Ausdehnung des Projektionssystems, nicht für alle Distanzen, insbesondere Nahdistanzen zwischen Projektionssystem und Objektraum umsetzbar ist.

Projektionseinheiten, welche durch Superpositionierung das gleiche resultierende Muster erzeugen, werden nach [Bre12c] zusammenfassend als Projektionsgruppe bezeichnet (Abbildung 2.6 (a)). Der Vorgang der Superpositionierung beschreibt dabei das präzise Anordnen einzelner Bauteile in der Fläche, sowie die präzise Ausrichtung der Strahlengänge im Raum. Nach [Bre12c] wird jede Projektionsgruppe von genau einer LED beleuchtet. Zur Steigerung der Luminanz bilden mehrere Projektionsgruppen dasselbe resultierende Muster ab. Zusammengefasst werden diese Projektionsgruppen mit demselben resultierenden Muster in Projektionscluster. Die Summe aller Projektionscluster, unabhängig vom abgebildeten Muster, bildet abschließend das Projektionssystem.

Die Lichtstärke dieses Projektionssystems ist ausschließlich von der Anzahl an Projektionsgruppen beziehungsweise LED pro Projektionscluster abhängig. Damit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Grundfläche des Projektionssystems und seiner Lichtstärke [Sie12].

Zusätzlich zu den drei erfüllten Aspekten schneller Musterwechsel, hohe Lichtstärke und kompakte Bauweise besitzt die LED-Arrayprojektion den messtechnisch entscheidenden Vorteil der stark vergrößerten Schärfentiefe gegenüber konventionellen Projektionssystemen mit ausschließlich einer Apertur. Dabei bedient man sich der Vorzugsrichtung, der Richtung minimaler Frequenzen von Mustern im Bereich der Streifenprojektion mit periodischer  $(1 + \cos)$  oder aperiodischer

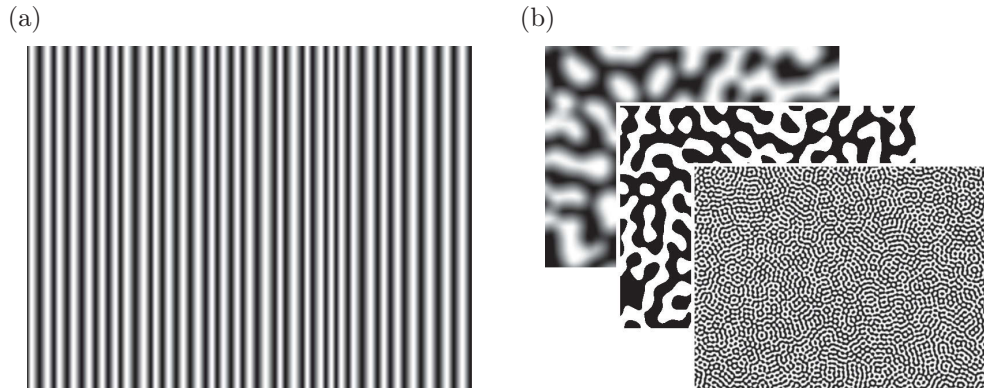


Abbildung 2.7: Zu  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen alternative Muster als temporäre Objekttextur.

- (a) Aperiodische, in Amplitude und Phase modulierte  $(1 + \cos)$ -Streifenmuster.  
 (b) Bandbegrenzt statistische Grauwertverteilungen – von niedriger mittlerer Ortsfrequenz ( $f_m = 3,75 \cdot 10^{-3} \frac{\text{LP}}{\text{px}}$ ) oben links zu hoher mittlerer Ortsfrequenz ( $f_m = 1,31 \cdot 10^{-2} \frac{\text{LP}}{\text{px}}$ ) unten rechts (ähnlich [Lut13]).

Intensitätsverteilung. Werden die Projektionsgruppen eines Projektionsclusters in der Vorzugsrichtung angeordnet, ergibt sich anstelle einer runden eine elliptische Gesamtapertur für dieses Gesamtmuster. Die elliptische Ausdehnung resultiert nach Smith [Smi07] in einem (signifikant) vergrößerten Schärfentiefebereich.

### 2.3.2 Hochgeschwindigkeitsprojektion statistischer Intensitätsverteilungen

Für die dreidimensionale Vermessung relativ zum Sensorsystem bewegter Objekte ist eine sehr schnelle Mustervariation im Objekt- beziehungsweise Messraum notwendig. Dies kann einerseits durch einen vollständigen Austausch der projizierten Intensitätsverteilungen realisiert werden, andererseits auch durch rasche Bewegung eines einzelnen Musters. Genau dieser Ansatz wird bei dem in diesem Abschnitt beschriebenen Ansatz verfolgt. Durch LED-Beleuchtung exakt eines Dias oder einer Laserprojektion auf eine Streuscheibe wird im Objektraum eine Intensitätsverteilung in Form eines bandbegrenzt statistischen Musters, wie in Abbildung 2.7 (b) visualisiert, erzeugt. Die Variation der auf das Dia negativ geschriebenen Intensitätsverteilung, bezogen auf den jeweiligen Ort der Abbildung, erfolgt durch Ablenkung mithilfe eines taumelnden Spiegels [Gro11]. Dabei hängt die Geschwindigkeit der Spiegelbewegung von der zu erzielenden 3D-Bildrate  $f_{ps}^{3D}$ , der mittleren Ortsfrequenz des Musters  $f_m$  und der Anzahl für die Korrelation eines dreidimensionalen Resultates genutzter Bildaufnahmen  $N$  ab. Alternativ wird für die Ablenkung des Laserstrahls ein akusto-optischer Modulator verwendet [Sch11a].

Die Korrelation von 2D-Bildpunkten zwischen den zumeist verwendeten zwei Kameras über eine Sequenzlänge hinweg wird dabei wie folgt realisiert. Die Variation statistischer Muster im Objektraum ergibt für jeden Kamerabildpunkt betrachtet eine zeitliche Abfolge von Intensitätswerten. Diese Abfolge beschreibt den Zusammenhang zwischen 3D-Objektpunkt und 2D-Bildpunkt eines Kamerasensors. Zum Auffinden homologer Punkte, also Abbildungen ein und desselben Objektpunktes in verschiedenen Sensorebenen, wird genau diese zeitliche Abfolge von Intensitätswerten beziehungsweise die im Sinn kleinster Fehlerquadrate bestpassende Abfolge im anderen Kamerabild gesucht. Formal lässt sich dies nach Wiegmann et al. [Wie06] durch folgenden Zusammenhang

beschreiben, wobei  $\widetilde{I}_n^c$  als der mittlere Grauwert über die Zeit hinweg definiert ist:

$$\rho(x^{c1}, y^{c1}) = \frac{\sum_{n=1}^N \left( I_n(x^{c1}, y^{c1}) - \widetilde{I}_n^{c1} \right) \cdot \left( I_n(x^{c2}, y^{c2}) - \widetilde{I}_n^{c2} \right)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \left( I_n(x^{c1}, y^{c1}) - \widetilde{I}_n^{c1} \right)^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N \left( I_n(x^{c2}, y^{c2}) - \widetilde{I}_n^{c2} \right)^2}} \quad (2.3)$$

Zur Vergrößerung der Robustheit des Korrelationsansatzes lässt sich neben der zeitlichen Komponente an Änderungen der Intensitätsverteilungen zusätzlich die räumliche Komponente nutzen. Jeder Bildpunkt  $(x, y)$  wird danach neben dem eigenen Grauwert  $I_n^c(x, y)$  zum Zeitpunkt  $t$  auch durch die Intensitätswerte einer zuvor definierten Umgebung  $(x \pm k_x, y \pm k_y)$  codiert. Die Bestimmung der Korrelationswerte  $\rho(x, y)$  erweitert sich damit nach Schaffer et al. [Sch10] zu

$$\rho(x^{c1}, y^{c1}, i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=-k_x}^{k_x} \sum_{j=-k_y}^{k_y} \left( I_n(x^{c1}+i, y^{c1}+j) - \widetilde{I}_n^{c1} \right) \cdot \left( I_n(x^{c2}+i, y^{c2}+j) - \widetilde{I}_n^{c2} \right)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{i=-k_x}^{k_x} \sum_{j=-k_y}^{k_y} \left( I_n(x^{c1}+i, y^{c1}+j) - \widetilde{I}_n^{c1} \right)^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{i=-k_x}^{k_x} \sum_{j=-k_y}^{k_y} \left( I_n(x^{c2}+i, y^{c2}+j) - \widetilde{I}_n^{c2} \right)^2}} \quad (2.4)$$

$\widetilde{I}_n^c$  beschreibt im Gegensatz zu Gleichung (2.3) hierbei den mittleren Grauwert sowohl über die Zeit als auch die räumliche Umgebung  $(x \pm k_x, y \pm k_y)$ .

Bei der Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten in dynamischen Messsituationen lässt sich abhängig von der Geschwindigkeit  $v_{\text{rel}}$  der Fokus verstärkt auf die zeitliche Korrelation oder im Fall eines hohen  $v_{\text{rel}}$ -Wertes auf die räumliche Korrelation legen. Einzelheiten hierzu sind den Veröffentlichung von Harendt et al. [Har13], [Har14a] und insbesondere [Har14b] zu entnehmen.



## Kapitel 3

# Theoretische Grundlagen der 3D-Bewegungskompensation

Neben den im vorangegangenen Kapitel 2 beschriebenen Vorgehensweisen zur Handhabung dreidimensionaler Objektvermessungen mit vorhandener Relativbewegung zwischen Messobjekt und Sensor unter Zuhilfenahme von Hochgeschwindigkeitshardware, gilt es eine algorithmische Lösung für das berührungslose Vermessen in Bewegung zu entwickeln. Dabei sind die Vorteile einer Messsequenz und damit der Informationsgehalt einer Vielzahl simultan projizierter und aufgenommener Grauwertbilder pro dreidimensionaler Objektrekonstruktion gegenüber verkürzter Messsequenzen (Abschnitt 2.2) beizubehalten und zu nutzen.

### 3.1 Berechnungsrelevante Unterschiede zwischen statischen und dynamischen Messsetups

Die dreidimensionale Rekonstruktion makroskopischer Objekte auf Basis aktiver Streifenlichtprojektion erfolgt durch Triangulation korrespondierender 2D-Punkte, wie in Abschnitt 1.1 beschrieben. Dabei kann die Triangulation sowohl zwischen den Ebenen eines Kamerasensors und der Projektionseinheit, als auch zwischen mehreren (zumeist zwei) Kamerasensorebenen erfolgen. Letzteres Vorgehen besitzt im Allgemeinen den Vorteil der Verwendung baugleicher Hardware, so dass unter anderem Pixelinterpolationen in gleicher Art und Weise erfolgen. Damit können einige Fehlerquellen, wie verschiedene Grauwertquantisierung, differenziertes Rauschverhalten und unterschiedliche Verzeichnungen ausgeschlossen und der 3D-Rekonstruktionsfehler  $\sigma^{3D}$  reduziert werden.

Die zweidimensionalen Abbildungen ein und desselben 3D-Welt- beziehungsweise Objektpunktes in die verschiedenen Kamerasensorebenen werden als korrespondierend oder auch 2D-Punktkorrespondenz bezeichnet. Während die Bestimmung dieser Punktkorrespondenzen in der Photogrammetrie basierend auf sogenannten interessanten Merkmalspunkten erfolgt, wird in der Phasogrammetrie ein Zwischenschritt zur Bestimmung von *Roh-* und *Feinphasen*  $\phi_{\text{rel}}$  und  $\phi_{\text{abs}}$  genutzt. Die Ermittlung der Rohphasen aus Intensitätswerten der während der Musterprojektion aufgenommenen Bilder  $I^c$  wird durch den formalen Zusammenhang der Gleichung (1.2) beschrieben. Beide Verfahren, Photogrammetrie wie Phasogrammetrie, beschreiben damit Kamerasensorpunkte über einen Eigenschaftensvektor, dessen Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Kamerasensorebenen zur Korrespondenzsuche herangezogen wird. Da die Gegebenheit interessanter Objektpunkte, wie Kanten, Ecken und weiterer 3D-Strukturen objektabhängig ist, führt das Verfahren der Photogrammetrie häufig zu dünn besetzten *Korrespondenzmatrizen*. In einer Korrespondenzmatrix existiert für jede Pixelposition  $(x, y)$  eines Kamerabildes  $I^{c1}$ , auf die ein beleuchteter



Objektpunkt  $O_k$  abgebildet wird, ein Eintrag der korrespondierenden Pixelposition im anderen Bild  $I^{c2}$ . Besitzt ein Tupel  $(x, y)^{c1}$  keine Zuordnung zu einem Tupel  $(x, y)^{c2}$ , existiert an dieser Stelle in der Korrespondenzmatrix kein Eintrag. Im Gegensatz zur Photogrammetrie nutzt die Phasogrammetrie die aktive Streifenprojektion als temporäre Objekttextur und erzielt damit, in beleuchteten und von beiden Kameras beobachteten Bereichen der Messszene, vollständige Korrespondenzmatrizen.

Statische Messsetups zeichnen sich unter anderem dadurch aus, dass innerhalb der Zeitspanne  $T_{\text{Seq}}$  von Musterprojektion und simultaner Bildaufnahme keine relative Bewegung zwischen Messobjekt und Sensoreinheit vorherrscht und damit der Phasenschub  $\Delta\phi_{R_n}$  in den Musterprojektionen auch in den Bildaufnahmen als bekannt angesehen werden kann. Ist dieser zusätzlich über die gesamte Zeit  $T_{\text{Seq}}$  zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Musterprojektionen identisch, lässt sich die Auswertung der Gleichung (1.2) nach [Kre96, Abschnitt 4.5.2] weitgehend vereinfachen. Eine eindeutige Bestimmung der drei Unbekannten  $a$ ,  $b$  und  $\phi$  aus Gleichung (1.2) lässt sich durch Verwendung von mindestens drei Aufnahmen  $I_n$  realisieren. Weitere Aufnahmen  $n > 3$  führen zur Überbestimmtheit des hinsichtlich kleinster Fehlerquadrate zu minimierenden Gleichungssystems und damit zur Steigerung der Robustheit und Verringerung von Fehlern bei der Rohphasenermittlung. Die formal einfachste Lösungsform der Gleichung (1.2) nach  $\phi_{\text{rel}}(x, y)$  ist bei der Verwendung von vier Musterprojektionen und einem konstanten Phasenschub von  $\Delta\phi_{R_n} = 90^\circ$  durch Gleichung (3.1) gegeben.

$$\phi_{\text{rel}}(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (3.1)$$

Für dynamische Messsituationen mit bewegten Objekten und/oder in relativem Objektbezug mobilen Sensoren kann im Allgemeinen nicht von konstanten Phasenschritten zwischen je zwei zeitlich adjazenten Musterabbildungen ausgegangen werden. Auch die Konstanz von Punktkorrespondenzen  $(x_i, j_i)^{c1} \mapsto (x_j, y_j)^{c2}$ , mit  $c1$  und  $c2$  als Bezeichnungen für die Kamerabildebene, kann

der Phasenschub  $\Delta\phi_{R_n}$  als weiterer Gleichungsparameter betrachten und über eine zusätzliche Musterprojektion  $n = 4$  eindeutig bestimmen ließ, ist die Wiederherstellung von 2D-Punktkorrespondenzen über die gesamte Messzeit  $T_{\text{Seq}}$  nicht formal erfassbar.

Wie bereits beschrieben und in Abbildung 1.1 visualisiert, definiert sich eine 2D-Punktkorrespondenz über zwei Koordinatentupel  $(x_i, y_i)_n^{c1}$  und  $(x_j, y_j)_n^{c2}$ , sowie den beiden Abbildungen zugehörigen 3D-Objektpunkt  $O_k^n$ . Der Index  $k$  bezeichnet dabei die individuelle, aber feste Nummerierung eines jeden Objektpunktes  $O$  über alle Zeitpunkte  $n$  hinweg. In dynamischen Messsituationen sind zumeist alle drei Korrespondenzkomponenten nicht mehr ortsfest. Die Suche oder Verfolgung eines 2D-Bildpunktes kann ausschließlich auf Basis seines Aussehens erfolgen, bei Grauwertbildern definiert durch seinen Intensitätswert  $g(x, y) \in [0, 255]$  und gegebenenfalls zusätzlich durch Grauwertinformationen der Umgebung. Aufgrund der messtechnisch notwendigen Mustervariation zwischen den Aufnahmen  $I_n$  ist eine Positionsbestimmung von Bildpunkten auf Grauwertbasis ausgeschlossen. Für die Korrespondenzzuordnung über die Zeit  $T_{\text{Seq}}$  hinweg bleibt daher ausschließlich die Verfolgung der 3D-Objektpunkte  $O_k^n$ . Für die Wiederauffindbarkeit von Objektpunkten gilt der gleiche Grundsatz wie für die Korrespondenzsuche im Photogrammetriebereich: Die Beschreibung des Punktes muss sich für eine eindeutige Bestimmung von denen aller anderen (signifikant) unterscheiden. Als Unterscheidungsmerkmal lässt sich neben der Textur, die durch die variierende Musterprojektion verfälscht ist, ausschließlich der Gradientenverlauf zu Objektpunkten in der Umgebung in Betracht ziehen. Da diese pro 3D-Objektpunkt individuelle Gradientenvariation



innerhalb einer als klein anzusehenden Umgebung für messtechnisch relevante Objekte nicht gegeben ist, lässt sich die Objektpunktverfolgung ausschließlich global beziehungsweise für große Objektbereiche realisieren. Dies führt automatisch zu der Einschränkung, dass das zu vermessende Objekt während der Messzeit  $T_{\text{Seq}}$  keiner Deformation unterliegt. Diese Annahme soll für den im Fortgang des Kapitels beschriebenen Algorithmus als einzige gegebene Einschränkung betrachtet werden.

Das Flussdiagramm in Abbildung 3.1 gibt einen Überblick aller notwendigen und in den nachfolgenden Abschnitten dieses Kapitels im Detail beschriebenen Arbeitsschritte zur dreidimensionalen Bewegungsdetektion mit darauf aufbauender 3D-Bewegungskompensation.

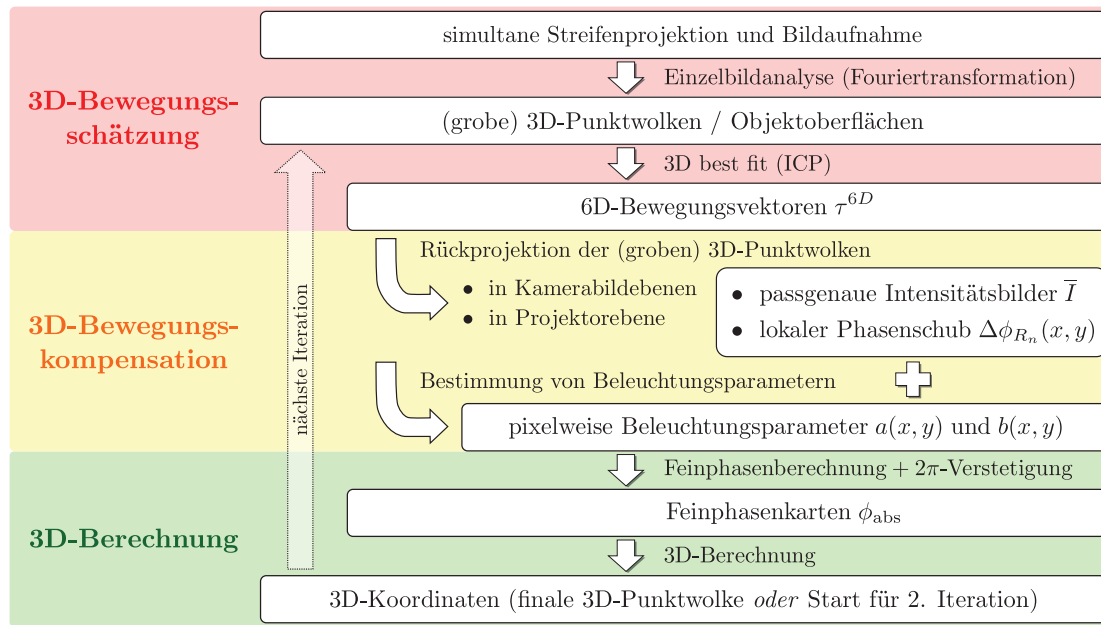


Abbildung 3.1: Flussdiagramm notwendiger Arbeitsschritte des dieser Arbeit zugrundeliegenden Verfahrens der Bewegungskompensation im dreidimensionalen Raum. Von oben nach unten lässt sich eine dreigeteilte Kategorisierung in Bewegungsschätzung (roter Bereich), Bewegungskompensation (gelber Bereich) und abschließender 3D-Berechnung (grüner Bereich) vornehmen.

## 3.2 Bewegungsdetektion

Für die dreidimensionale Detektion beziehungsweise Schätzung von Bewegung und damit der Bestimmung sechs-dimensionaler Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$  existieren zahlreiche Verfahren, welche in Teilen im Abschnitt 3.2.2 detailliert betrachtet und daher an dieser Stelle nicht näher erläutert werden. Allen Verfahren gemein ist die Eingabe von mindestens zwei 3D-Objektrepräsentationen, unabhängig davon, ob diese in Form von Oberflächen oder 3D-Punktwolken erfolgt. Damit ist die Bereitstellung im Vergleich zu Ground-Truth-Daten des zu vermessenden Objektes möglichst präziser 3D-Datensätze unumgänglich. Um relative Bewegung zwischen Messobjekt und Sensor weitgehend ausschließen zu können, empfiehlt sich die Berechnung dreidimensionaler Objektkoordinaten auf Datenbasis ausschließlich eines einzigen Aufnahmezeitpunktes  $t \in T_{\text{Seq}}$ . Messfehler aufgrund von Relativbewegung können auch für einen einzelnen Aufnahmezeitpunkt  $t$  mit einer Belichtungszeit  $T(t) > 0$  Sekunden nicht ausgeschlossen, aber zumindest minimiert werden.

### 3.2.1 Bestimmung grober 3D-Punktwolken durch Single-Shot-Analyse

Die Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten  $O_k$  basierend auf Bilddaten eines einzelnen Aufnahmezeitpunktes wird als Einzelbildanalyse oder auch Single-Shot-Analyse bezeichnet. Prominenteste Vertreter dieses Ansatzes sind sogenannte Time-of-Flight-Kameras und das Kinect-System von Microsoft [Mic14][Lau13].

Time-of-Flight-Kameras, häufig aufgrund ihres Photomischdetektors auch als PMD-Kameras bezeichnet, bestimmen die Entfernung zwischen der Messszene und der Sensorebene flächenhaft auf Basis von Lichtlaufzeiten [Hec08][Sch11b]. Ähnlich dem Verfahren des punktuellen Laserscanning werden von LEDs oder Laserdioden ausgehend Lichtpulse in Richtung des Messobjektes ausgesendet und deren Dauer bis zur Reflexionsdetektion auf dem PMD-Sensor gemessen. Diese Zeitspanne ist proportional zur Distanz zwischen Messobjekt und Sensor, welche je nach Systemauslegung zwischen einigen Dezimetern und ungefähr 40 Metern liegen darf. Ein entscheidender Vorteil der ToF-Technik liegt in der Messgeschwindigkeit [Zha10]. So liegt das flächenhafte 3D-Ergebnis in Echtzeit ausgewertet vor; die schnellsten Systeme arbeiten aktuell bei 160 3D-Bildern pro Sekunde [Blu14]. Zusätzlich werden neben den dreidimensionalen Messdaten systemabhängig meist auch Texturbilder in schwarz-weiß oder auch farbig in höherer Auflösung bereitgestellt und können bei Bedarf direkt mit den 3D-Daten verknüpft werden. Aufgrund der Vorgehensweise basierend auf der Reflexionsdetektion bestehen allerdings insbesondere für dunkle bis schwarze Oberflächen, sowie glänzende Objektabschnitte große Unsicherheiten in den Distanzmaßen; teilweise ist überhaupt keine Vermessung möglich. Ein weiterer Nachteil von Time-of-Flight-Kameras liegt in deren maximaler Auflösung, das heißt der Anzahl der Messpunkte, die weitverbreitet bei  $204 \times 204$  Pixel (zum Beispiel „PMD CamCube 3.0“ [pmd14]) mit Ausnahme des „real.iZ-1K“-Systems von „odos imaging“ bei  $1.280 \times 1.024$  Pixel liegt [odo14].

Ursprünglich als Einheit zur Steuerung einer Videospielekonsole konzipiert, hat sich das Kinect-System von Microsoft zunehmend auch für Messanwendungen etabliert, in denen der Fokus auf Messgeschwindigkeit und Gestenerkennung liegt. Messunsicherheiten von anwendungsabhängig bis zu mehreren Zentimetern [Kho12] werden dabei akzeptiert. Grundsätzlich basiert die 3D-Datengewinnung auf dem Prinzip der Triangulation zwischen Projektions- und Aufnahmeeinheit [Fre10]. Als temporäre Textur wird hierzu ein konstantes Punktmuster im Infrarotbereich weitwinklig in den Raum gestreut und dessen Änderung gegenüber einem Referenzmuster bestimmt, welches bei Aufnahme einer Ebene in definiertem Abstand zum Sensor a priori erzeugt wurde und im Speicher der Kinect hinterlegt ist. Zur Ermittlung der Musteränderung werden die Referenzaufnahme und das aktuelle Infrarotbild räumlich korreliert. Die Verschiebung von Musterstrukturen auf der Sensorebene in Pixeln ist anschließend in Objektkoordinaten konvertierbar. Während der Farbsensor der aktuellen Kinect 2 mit FullHD-Auflösung arbeitet, ist der Infrarotsensor auf  $512 \times 424$  Pixel beschränkt. Dies ermöglicht eine 3D-Ergebnislatenz von gemittelt 60 ms, schränkt den Einsatz des Systems zur Objektvermessung aber erheblich ein. Wie [Kho12] zu entnehmen ist, hängt der konkrete 3D-Messfehler von der Sensorentfernung zur Messszene ab, welche zwischen 0,5 und 5 Metern, im Makromodus auch minimal 0,4 Meter betragen kann.

Gegenüber diesen, den jeweiligen Anwendungsanforderungen entsprechend optimierten und eher niedrig aufgelösten Systemen und Ansätzen, existieren verschiedene Verfahren zur Auswertung eines einzelnen Streifenbildes mit trigonometrischer Intensitätsverteilung. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind hierbei die Hilbert-Transformation [Hua98], die Wavelet-Analyse [Zho04][Gde06] und die Fouriertransformation [Tak83] zu nennen. Verschiedene Herangehensweisen führen dabei

jeweils zu einer Analyse im Streifenbild vorhandener Frequenzen und bilden damit die Basis zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten.

Als Signalanalyse im Ortsraum lässt sich die Hilbert-Transformation beziehungsweise in einer Weiterentwicklung die Hilbert-Huang-Transformation [Hua05][Tru13] verstehen, die den Zusammenhang zwischen dem Real- und Imaginärteil des Eingabesignals widerspiegelt. Da diese Transformationsform ausschließlich in Verbindung mit einer Hin- und Rückkonvertierung zwischen Orts- und Frequenzraum Anwendung findet, soll der Fokus im Folgenden auf andere, alleinstehende Verfahren gelegt werden.

Die beiden bekanntesten Verfahren zur Streifenbildauswertung, Wavelet-Analyse und Fouriertransformation, bilden beide den zeitlichen beziehungsweise örtlichen Signalverlauf einer Funktion in den Spektralbereich ab. In der konkret betrachteten Bildanalyse werden dabei Grauwerte als diskretisierte Signale mit ihrer jeweiligen Position auf dem Kamerasensor als Ort angesehen. Während die Wavelet-Analyse in verschiedenen Auflösungsstufen Korrelationswerte zwischen verschiedenen Funktionen einer sogenannten Waveletfamilie (abgeleitet durch Dilatation und Translation von einem sogenannten Mutterwavelet) und dem betrachteten Signal bestimmt, basiert die Fouriertransformation ausschließlich auf den trigonometrischen Funktionen Sinus und Kosinus. Entsprechend der Unschärferelation von Heisenberg [Hei27] lässt sich ein Signal nicht gleichzeitig sowohl in der Frequenz-, als auch zeitlich-räumlichen Komponente beliebig fein analysieren. Trotz dem Vorgehen mithilfe von Auflösungspyramiden lassen sich bei Verwendung der Wavelet-Analyse ausschließlich (schmale) Frequenzbänder für ein gegebenes Streifenbild bestimmen. Die signifikant feinere Frequenzauflösung unter zusätzlicher Kenntnis der alleinigen Projektion von  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen lässt sich durch die Fouriertransformation erzielen, weshalb dieses Verfahren neben den Einschätzungen von Su und Zhang [Su09], von Guo [Guo09], sowie von Zhang [Zha12], für dynamische Messungen geeignet zu sein, auch als Ausgang für die Einzelbildanalyse bei 3D-Vermessungen unter Bewegung genutzt werden soll. Der Wegfall jeglicher räumlicher Informationen wird dabei akzeptiert.

### 3.2.1.1 Zeilenweise 1D-Frequenzanalyse

Die einfachste Form der Überführung eines Streifenbildes vom Orts- in den Frequenzraum stellt die eindimensionale Analyse mittels Fouriertransformation dar. Da es sich bei einem Kamerabild um einen diskreten Funktionsverlauf handelt, besteht nach [Har78] formal folgender Zusammenhang zwischen dem Eingangsbild, im Folgenden dieses Unterkapitels 3.2 zur Vermeidung von Verwechslungen anstelle  $I(x)$  mit  $g(x)$  bezeichnet und seinem Frequenzspektrum  $G(f)$ :

$$G(f) = \sum_{x=0}^{M-1} g(x) \cdot e^{-ifx \frac{2\pi}{M}} \quad (3.2)$$

Dabei spiegelt  $M$  die Anzahl der Abtastorte, im konkreten Fall also die Anzahl der Pixel in der betrachteten Bilddimension wider. Unter gesamtheitlicher Betrachtung aller Frequenzen  $f$  besitzt der Vektor  $G(f) = A(f) + C(f) + C^*(f)$  per Definition die gleiche Länge wie  $g(x)$  [Kre96, Abschnitt 4.6], wobei aufgrund der reellen Werteverteilung  $g(x) \in \mathbb{R}$ ,  $G(f)$  einer hermiteschen Verteilung im Frequenzraum mit  $C(f) = C^*(-f)$  entspricht [Oni02]. Das Amplitudenspektrum  $|G(f)|$  ist damit symmetrisch zur Vektormitte, womit sich die kleinste, die Frequenz nullter Ordnung, zugehörig zu einer Funktion  $g(x)$  mit konstantem Wert, in der Vektormitte, die höchsten Frequenzen  $M/2$  an den Vektorenden befinden.

Zur Bestimmung der Phasenverteilung eines Interferenz- beziehungsweise Streifenbildes  $g(x)$

mit  $(1 + \cos)$ -Grauwertverlauf sind eine Bandpassfilterung  $[f_0 - \epsilon_{\min}, f_0 + \epsilon_{\max}]$  mit  $f_0$  der Fundamentalfrequenz, sowie die Rücktransformation (Gleichung (3.3)) in den Ortsraum notwendig. Unabhängig der konkreten Ausgestaltung des Bandpasses wird bei dieser Filterung ausschließlich ein konkreter Bereich des wahlweise komplexen Anteils  $C(f)$  oder des komplex konjugierte Anteils  $C^*(f)$  des Amplitudenspektrums  $|G(f)|$  beibehalten. Aufgrund der Tatsache, dass das Zwischenergebnis  $\overline{|G(f)|}$  die hermitesche Eigenschaft nicht mehr erfüllt, führt die Weiterverarbeitung unter Anwendung der inversen Fouriertransformation

$$\overline{g(x)} = \frac{1}{M} \sum_{f=0}^{M-1} \overline{G(f)} \cdot e^{ifx \frac{2\pi}{M}} \quad (3.3)$$

sowohl zu einem reellen  $\Re(\overline{g(x)})$ , als auch einem imaginären Ergebnisteil  $\Im(\overline{g(x)})$ . Aus diesen beiden Anteilen lässt sich nach Weinstein und Ebert [Wei71] durch Anwendung des Arkustangens die gesuchte Rohphase  $\phi_{\text{rel}}(x) \in [-\pi, \pi)$  bestimmen:

$$\phi_{\text{rel}}(x) = \arctan \frac{\Im(\overline{g(x)})}{\Re(\overline{g(x)})} \quad (3.4)$$

### 3.2.1.2 3D-Koordinatenbestimmung auf Phasenbasis

Zur Überführung von Phasenwerten in dreidimensionale Koordinatenwerte stellten Takeda und Mutoh 1983 als erste ein entsprechendes Verfahren, die sogenannte „phase-to-height conversion“ als Teil der „Fourier transform profilometry“ vor [Tak83]. Hierbei werden  $2\pi$ -verstetigte Phasenverteilungen des Objektes und einer Referenzebene verglichen. Diese Differenzen lassen sich unter Kenntnis zahlreicher Parameter der Systemgeometrie in Höhenwerte und damit 3D-Objektkoordinaten konvertieren. Auf einen Ansatz zur  $2\pi$ -Verstetigung der wie im vorangegangenen Abschnitt 3.2.1.1 bestimmten Rohphase  $\phi_{\text{rel}}(x)$  soll erst später eingegangen werden.

Die vollständige Vorgehensweise, sowie mehrere Varianten der Systemausgestaltung können im Detail der vorgenannten Veröffentlichung [Tak83] entnommen werden. Der Verständlichkeit halber soll an dieser Stelle ausschließlich das unter anderem für die Vergleichsergebnisse im Abschnitt 4.3.1 verwendete Verfahren im Groben beschrieben werden.

Basis ist eine Systemanordnung bestehend aus einer Kamera und einem Projektionssystem mit parallelen optischen Achsen, welche senkrecht auf der Referenzebene stehen. Diese Anordnung ist schematisch in Abbildung 3.2 (a) veranschaulicht. Dabei spiegeln  $l_0$  den Abstand zwischen den jeweiligen Position von Kamera und Projektionssystem im Raum zur Referenzebene  $R$  wider,  $d$  die Distanz zwischen Kamera und Projektionssystem. Die Streifenbreite einer  $(1 + \cos)$ -Periode auf der Referenzebene wird durch  $p_0$  beschrieben. Mit ihrem Nullwert auf  $R$  liegend, soll die zu ermittelnde Höhe des jeweils betrachteten Objektpunktes im Folgenden mit  $h$  bezeichnet sein.

Unabhängig voneinander werden die Rohphasenkarten  $\phi_{\text{rel}}^{\text{Bild}}(x, y)$  und  $\phi_{\text{rel}}^{\text{Ref}}(x, y)$  durch Einzelbildanalyse mithilfe der von der Projektionsrichtung abhängigen zeilen- oder spaltenweisen Fouriertransformation bestimmt. Für den Schritt der Bandpassfilterung im Frequenzbereich werden die Lage der Fundamentalfrequenz  $f_0$  und Ausdehnung  $\epsilon$  des ersten Peaks  $Q_1$  ermittelt und ausschließlich die zugehörigen Frequenzen  $Q_1 = [f_0 - \epsilon_{\min}(f_0), f_0 + \epsilon_{\max}(f_0)]$  zu Rohphasen weiterverarbeitet (siehe Abbildung 3.2 (b)). Eine Inklusion weiterer Peaks  $Q_i$  in die Weiterverarbeitung hätte Schwebungseffekte bei der Differenzbildung mit der Referenzphasenverteilung zur Folge. An die Rohphasenbestimmung anschließend erfolgt eine  $2\pi$ -Verstetigung der im Wertebereich

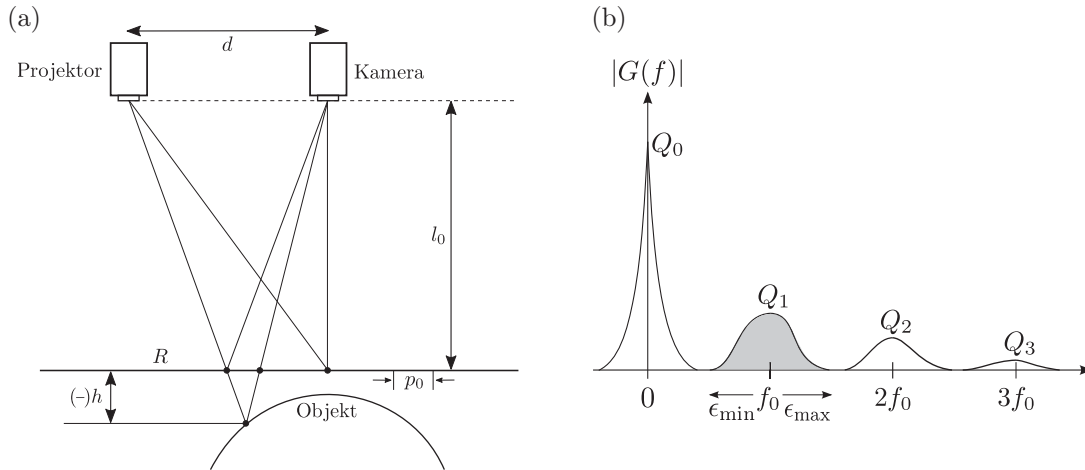


Abbildung 3.2: (a) Systemanordnung mit parallelen optischen Achsen bestehend aus einer Kamera und einem Projektionssystem zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten unter Nutzung einer Referenzebene (ähnlich [Tak83]). (b) Bandpassfilterung des ausschließlich ersten Frequenzpeaks  $Q_1$  ungleich des Gleichlichtanteils mit der Ausdehnung  $[f_0 - \epsilon_{\min}(f_0), f_0 + \epsilon_{\max}(f_0)]$  (nach [Tak83]).

$[-\pi, \pi)$  liegenden Rohphasen durch schrittweise Addition von  $2\pi$  oder  $-2\pi$  an Sprungstellen. Ein erweiterter Algorithmus zur Reduktion von Verstetigungsfehlern ist [Tak83, Abschnitt V] zu entnehmen. Die Differenz der beiden  $2\pi$ -verstetigten, sogenannten Feinphasenkarten ergibt mit  $\Delta\phi_{\text{abs}}(x, y) = \phi_{\text{abs}}^{\text{Bild}}(x, y) - \phi_{\text{abs}}^{\text{Ref}}(x, y)$  die Eingabe für die „phase-to-height“-Konvertierung. Diese wird formal mit folgendem Zusammenhang beschrieben:

$$h(x, y) = \frac{l_0 p_0 (\Delta\phi_{\text{abs}}(x, y)/2\pi)}{p_0 (\Delta\phi_{\text{abs}}(x, y)/2\pi) - d} \quad (3.5)$$

Die Präzision dieser Höhenbestimmung ist unter anderem von der Genauigkeit der Systemanordnung abhängig, wobei nach [Tak83] sowohl die verwendete Kamera als auch das Projektionssystem zwingend senkrecht auf die Referenzebene ausgerichtet sein müssen. Jede Abweichung hiervon führt zu 3D-Fehlern in der Bestimmung der Objektoberfläche. Eine verallgemeinerte Möglichkeit der Komponentenanzordnung ist durch Huang et al. beschrieben [Hua14].

### 3.2.1.3 Globale 2D-Frequenzanalyse

Der Ansatz eindimensionaler Fouriertransformation, wie er in Abschnitt 3.2.1.1 vorgestellt wurde, ist nicht ausschließlich auf den eindimensionalen Einsatz beschränkt. Wie in Abschnitt 3.2.1.2 gezeigt, ist die Anwendung auch für zweidimensionale Signale wie Kameraaufnahmen zeilen- oder spaltenweise möglich. Dies funktioniert insbesondere für Streifenverteilungen parallel zu der Koordinatenachse, zu der die Analyse stattfindet, ohne gravierende Nachteile. Ausschließlich für Bereiche mit durch die lokale Objekttopografie bedingt starken Streifendeformationen, sind Fehlinterpretationen im Frequenzbereich festzustellen. Dies gilt im Besonderen für den Fall der Streifenprojektion weitgehend nicht parallel zu einer der Koordinatenachsen beziehungsweise im Extremfall einer diagonal zu den Bildgrenzen stehenden Streifenrichtung. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit bezüglich der konkreten Achsenbezeichnung ist eine eindimensionale Frequenzanalyse parallel zur  $x$ -Achse bei einer Projektion parallel zur  $y$ -Achse ohne Aussage. Dies ist

äquivalent zum angesprochenen Extremfall der diagonalen Projektionsrichtung in Verbindung mit einer durch die Objekttopografie bedingten, 45 Grad umfassenden Streifendeformation.

Für alle vorgenannten Fälle und damit allgemeingültig empfiehlt sich eine zeitgleiche Frequenzanalyse in beiden Koordinatenrichtungen  $x$  und  $y$ . Die sogenannte zweidimensionale Fouriertransformation wird formal – für quadratische Bilder mit  $M = N$  – wie folgt beschrieben:

$$G(f_x, f_y) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} g(x, y) \cdot e^{-i \frac{2\pi}{M} (x f_x + y f_y)} \quad (3.6)$$

Für die Rücktransformation aus dem bandpassgefilterten Frequenz- in den Ortsbereich gilt dann:

$$\overline{g(x, y)} = \frac{1}{F^2} \sum_{f_x=0}^{F-1} \sum_{f_y=0}^{F-1} \overline{G(f_x, f_y)} \cdot e^{i \frac{2\pi}{F} (x f_x + y f_y)} \quad (3.7)$$

Die Bestimmung der  $2\pi$ -stetigen Rohphase  $\phi_{\text{rel}}(x, y)$  erfolgt analog zum Vorgehen der eindimensionalen Fouriertransformation in Gleichung (3.4) jetzt mit dem Parametertupel  $(x, y)$ .

#### 3.2.1.4 Stereobasierte Punktwolkenermittlung mit absoluter Raumlage durch Markerdetektion

Unter anderem aufgrund vergleichbarer Fehlereinflüsse der Einzelkomponenten und einem symmetrischen Systemaufbau werden aus Optimierungsgründen hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit der ermittelten 3D-Objektkoordinaten in der Praxis vielfach Sensorsysteme mit zwei (baugleichen)

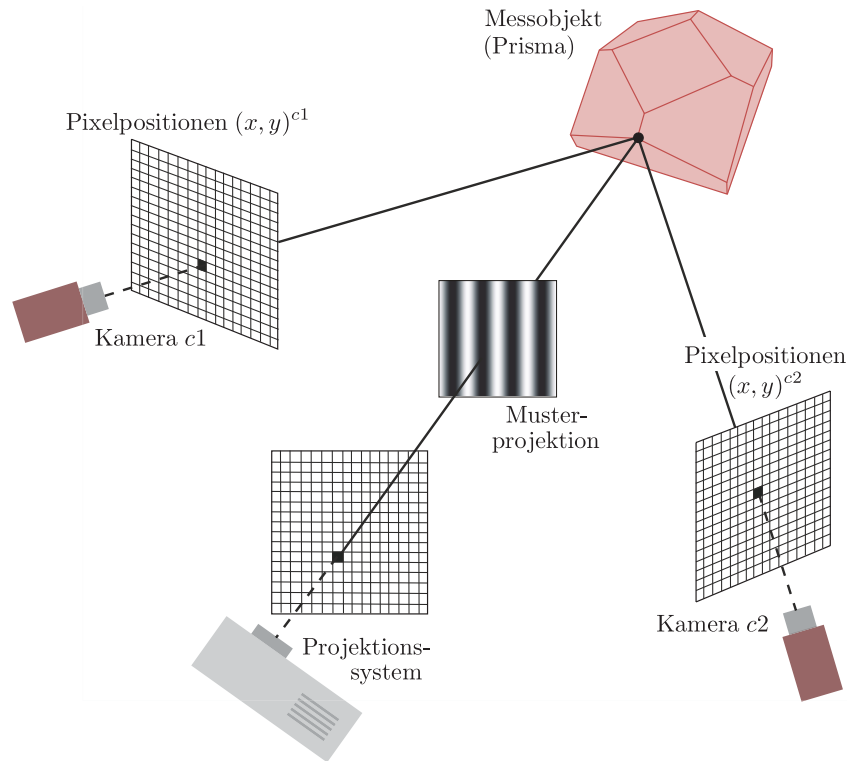


Abbildung 3.3: Stereokamerabasierte Suche nach 2D-Punktkorrespondenzen unter Verwendung temporärer Streifenprojektion in  $(1 + \cos)$ -Form, sowie Epipolargeometrie zur Suchraumeinschränkung auf eine Dimension.

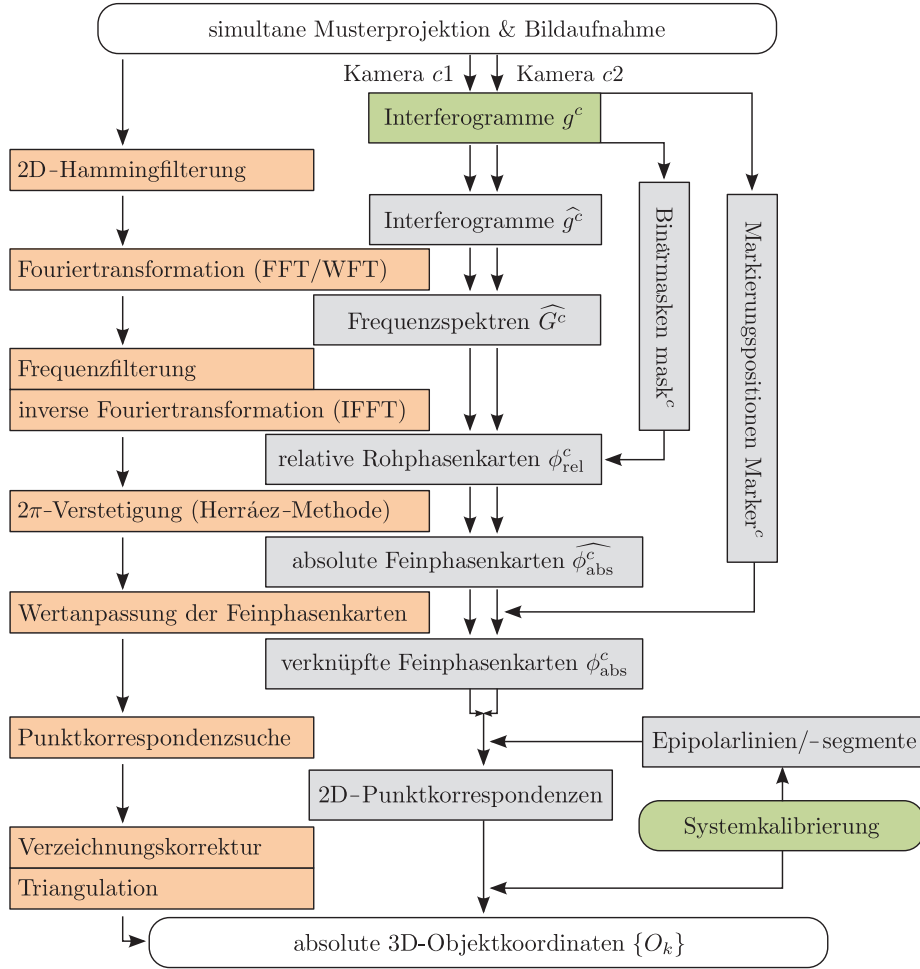


Abbildung 3.4: Stereo-Single-Shot-Analyse (SSSA): Flussdiagramm zum Vorgehen bei der Bestimmung einer 3D-Punktwolke  $\{O_k\}$  aus zwei Kamerabildern  $g^c$  eines Aufnahmezeitpunktes  $n$ . Dabei sind grün die Eingabedaten, grau die jeweiligen Zwischenergebnisse und orange die einzelnen Algorithmen markiert.

Kameras verwendet, wie es schematisch in Abbildung 3.3 visualisiert ist. Damit stehen grundsätzlich zu einem einzigen Aufnahmezeitpunkt  $n$  Informationen aus zwei verschiedenen Perspektiven für eine Auswertung zur Verfügung. Diese gegenüber dem Ein-Kamera-System zusätzlichen Bildinformationen gilt es für die dreidimensionale Objektrekonstruktion auch im Fall mit relativer Bewegung  $v_{rel}$  zu nutzen, da eine möglichst hohe Präzision dieser Daten  $\{O_k\}$  als Start für alle nachfolgenden Arbeitsschritte der dreidimensionalen Bewegungsdetektion und anschließenden Bewegungskompensation (vergleiche Abbildung 3.1) essentiell ist, wie den Untersuchungen in Abschnitt 4.6.1 entnommen werden kann. Das Flussdiagramm in Abbildung 3.4 zeigt den Ablaufplan im Einzelnen verwendeter Algorithmen, welche im Folgenden detailliert beschrieben sind.

Ausgangspunkt für die im Gesamten bezeichnete „Stereo-Single-Shot-Analyse“, im Folgenden auch durch „SSSA“ abgekürzt, ist die simultane Projektion einer  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung und Aufnahme dieser mithilfe von zwei Flächenkameras. Die einzelnen Aufnahmen sollen dabei den Kameras  $c1$  und  $c2$  zugeordnet durch  $g^{c1}$ , sowie  $g^{c2}$  bezeichnet sein. Für die folgenden Schritte in der Kette der Erstellung grober 3D-Objektkoordinaten erfolgt eine separierte Bearbeitung der Ansichten  $g^{c1}$  und  $g^{c2}$ , weshalb die Darstellung zunächst auf  $g^c$  verallgemeinert wird.



## 2D-Hamming-Filterung und Frequenzanalyse mittels Fouriertransformation

Ähnlich den Vorgehensweisen der Abschnitte 3.2.1.1 und 3.2.1.3 schließt sich an die Bildaufnahme die Konvertierung der Intensitätsbilder vom Ortsraum in den Frequenzbereich an. Zur Verringerung der Frequenzstreuung und damit der Verdeutlichung lokaler Maxima im Spektrum, sowie zur Verringerung starker Analysefehler an den Bildrändern aufgrund des Gibbs'schen Phänomens [Hew79], wird das Eingabebild  $g^c$  mit dem sogenannten Hamming-Fenster multipliziert [Guo08]. Das Hamming-Fenster ist dabei nach [Ham77] eindimensional wie folgt definiert:

$$h_{1D}(M) = \sum_{l=M/2}^{M/2-1} 0,54 + 0,46 \cdot \left( \frac{2\pi l}{M} \right) . \quad (3.8)$$

Für eine zweidimensionale Anwendung lässt sich diese eindimensionale Definition mit ihrer Transponierten multiplizieren, wobei  $M$  der Breite der Bilddaten in Pixel und  $N$  der Höhenausdehnung entsprechen:

$$h_{2D} = h_{1D}(M) \cdot h_{1D}(N)^T . \quad (3.9)$$

Das hamming-gefilterte Bild  $\hat{g}^c$  wird anschließend mithilfe der in Abschnitt 3.2.1.3 vorgestellten zweidimensionalen Fouriertransformation in den Frequenzraum überführt. Die Verdeutlichung der Spektrummaxima durch die Multiplikation mit dem Hamming-Fenster erleichtert das Filterdesign zur Extraktion der relativen Phaseninformationen gegenüber unerwünschter Störgrößen. Im Gegensatz zum Vorgehen bei Takeda und Mutoh [Tak83], sowie zahlreichen weiteren Veröffentlichungen anderer in diesem Bereich, wird ausschließlich der komplex konjugierte Anteil im Frequenzspektrum  $C^*$ , sowie weiträumig der Gleichlichtanteil  $A$  entfernt. Die Beibehaltung hoher Frequenzen ermöglicht dabei die Erhaltung von Kanteninformationen. Weiträumige Frequenzelimination ist in diesem Zusammenhang durch die mittlere Frequenz zwischen Gleichlichtanteil und Maximum des ersten Frequenzpeaks, wie in Abbildung 3.5 beispielhaft am Spektrum einer Simulationskugel durch eine rot gestrichelte Linie gezeigt, definiert. Zur Rückkonvertierung des gefilterten Frequenzspektrums  $\hat{G}^c$  mithilfe der inversen Fouriertransformation (IFFT) führt wie in Abschnitt 3.2.1.1 zu den zwei gefilterten Bildanteilen  $\Re(\overline{g(x)})$  und  $\Im(\overline{g(x)})$ , dessen Quotient die Rohphase  $\phi_{\text{rel}}(x, y) \in [-\pi, \pi)$  widerspiegelt.

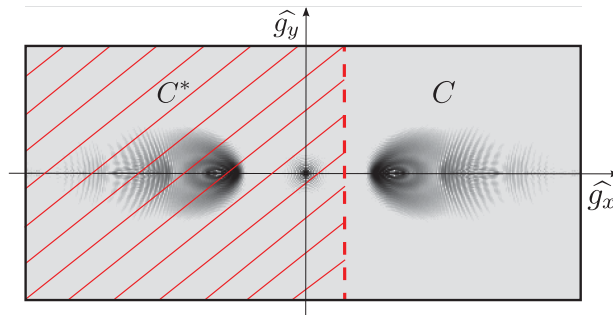


Abbildung 3.5: Frequenzfilterung bei Ausführung der Stereo-Single-Shot-Analyse. Im Gegensatz zu anderen bekannten Filterverfahren zur Gewinnung von Phasenwerten aus Streifenbildern werden einem Hochpass entsprechend ausschließlich der komplex konjugierte Frequenzanteil  $C^*$ , sowie das Gleichlicht eliminiert (rot gestrichen). Neben dem vollständigen ersten Frequenzpeak werden auch hohe Frequenzen für die weiteren Bearbeitungsschritte beibehalten.



### Ausschluss unbeleuchteter Bildbereiche von weiterer Bearbeitung

Vor der Weiterverarbeitung der ermittelten Rohphasen sollen zur Beschleunigung aller folgenden Schritte unbeleuchtete Bildbereiche ausgeschlossen werden. Dies erfolgt direkt aus den Eingabebildern  $g^c$  abgeleiteten, sogenannten Binärmasken  $\text{mask}^{c1}(x, y)$  und  $\text{mask}^{c2}(x, y)$ . Für die Bestimmung dieser Masken, wobei der Eintrag 0 für schattierte oder nicht beleuchtete Szenenbereiche steht, hat sich empirisch auf Basis mehrerer bestehender 3D-Messsysteme folgende Ermittlung als praktikabel manifestiert:

$$\text{Var}(x, y) = \left( \max_{i,j} g(x \pm i, y \pm j) - \min_{i,j} g(x \pm i, y \pm j) \right) \cdot \frac{1}{(2i+1)(2j+1)} \sum_{l=x-i}^{x+i} \sum_{m=y-j}^{y+j} g(l, m) \quad (3.10)$$

Dabei besitzt die Pixelumgebung zum Beispiel für Bildgrößen von  $1.024 \times 1.024$  Pixel eine Größe von  $7 \times 7$  Pixel. Für die ganzzahligen Indizes als Manhattan-Distanz [Kra75] zum aktuell betrachteten Pixel  $(x, y)$  gilt damit  $i, j \in [0, 3]$ , die Laufvariablen  $l$  und  $m$  liegen im Wertebereich  $[-3, 3] \in \mathbb{Z}$ . Die eigentliche Binärmaske wird dann auf Basis eines teilweise an das verwendete Messsystem angepassten Schwellwertes  $\text{thr}$  erstellt:

$$\text{mask}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{Var}(x, y) \geq \text{thr} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.11)$$

Die Verwendung der Grauwertvarianz innerhalb einer von der Breite abgebildeter  $(1 + \cos)$ -Perioden abhängigen Pixelumgebung besitzt gegenüber festen Intensitäts-Schwellwerten den entscheidenden Vorteil, dass dunkle Periodenbereiche in folgenden Berechnungen mit betrachtet werden. Des Weiteren sollte die Größenwahl der Pixelumgebung eher einschränkend erfolgen, um unpräzise Binärmasken zu vermeiden.

Nach dem Ausschluss unzureichend beleuchteter Bildbereiche müssen die zuvor bestimmten Rohphasenkarten für beide Ansichten  $c1$  und  $c2$  jeweils einzeln global verstetigt und anschließend in einen für Triangulationsalgorithmen notwendigen, deckungsgleichen Wertebereich gebracht werden. Zur Verstetigung wird dabei das zweidimensionale Verfahren von Herráez et al. [Her02] verwendet, welches nach Abdul-Rahman et al. [AR07] als robust und ressourcenschonend einzuschätzen und folgend zur Förderung des Allgemeinverständnisses kurz erläutert ist.

### $2\pi$ -Verstetigung von Rohphasenkarten $\phi_{\text{rel}}^c$ mittels der Herráez-Methode

Basis des Verstetigungsalgorithmus sind Zuverlässigkeitswerte  $R$ , die sowohl durch Phasendifferenzen zwischen orthogonal benachbarten Pixeln, zusätzlich aber auch mit Differenzwerten der vier Diagonalen bestimmt werden. Die Verwendung der sogenannten „zweiten Differenzen“ (Diagonalwerte) verbessert die Detektion von Unstetigkeiten in den Phasenkarten  $\phi_{\text{rel}}(x, y)$  [Qui95]. Durch den Zusammenhang  $R = 1/D$ , mit  $D$  dem hier nicht näher formal definierten Zusammenhang der Differenzen der Achternachbarschaft eines Pixels  $(x, y)$ , ergeben sich für höhere Differenzen kleine Zuverlässigkeitswerte und umgekehrt. Anschließend wird für jede Verbindungskante zwischen zwei orthogonal adjazenten Pixeln die Summe aus den Zuverlässigkeitswerten dieser beiden Pixel bestimmt. Daran schließt sich die eigentliche  $2\pi$ -Verstetigung an, bei der absteigend und fortwährend die zwei orthogonal adjazenten Pixel miteinander verstetigt werden, die die global über das Bild betrachtet aktuell höchste Summe aus Zuverlässigkeitswerten  $R$  besitzt. Es ergeben sich damit sukzessive mehr und mehr kleine Cluster, deren Pixel zueinander verstetigt sind. Spiegelt die aktuell höchste  $R$ -Summe eine Kantenverbindung zwischen zwei in sich verstetigten

Pixelclustern wider, werden diese beiden zueinander verstetigt; die Anzahl der Cluster sinkt um eins. Dieses Greedy-Verfahren wird fortgeführt, bis alle Pixel des betrachteten Bildes miteinander verstetigt sind, die Clusteranzahl global nur noch eins beträgt.

Dieses Verfahren der  $2\pi$ -Verstetigung entlang nicht-kontinuierlicher Pfade ermöglicht gegenüber globalen Verstetigungsverfahren, die von einem Punkt ausgehend fortlaufend verstetigen, sowie dem in Abschnitt 3.2.1.2 durch Takeda et al. [Tak83] vorgestellten Vorgehen, zusätzlich eine weitgehend zuverlässige Bearbeitung von Unstetigkeitsstellen, deren Phasendifferenz zwischen zwei benachbarten Pixeln größer  $2\pi$  ist, aber an anderer Stelle im Bild eine korrekte Verstetigung durch Addition oder Subtraktion eines Wertes im Bereich  $[0, 2\pi)$  durchgeführt werden kann.

### Wertanpassung absoluter Feinphasenkarten $\widehat{\phi_{\text{abs}}^c}$ mithilfe von Markerpositionen

Die Korrespondenzsuche zwischen 2D-Bildkoordinaten verschiedener Ansichten auf Basis von Phasenwerten setzt voraus, dass Punktkorrespondenzen (2D-Abbildungen ein und desselben 3D-Objektpunktes) den gleichen oder zumindest einen sehr ähnlichen Feinphasenwert  $\widehat{\phi_{\text{abs}}^c}$  in beiden betrachteten Kameraperspektiven besitzen. Dies ist nach dem vorgestellten Verstetigungsprozess nach Herráez et al. [Her02] nur per Zufall beziehungsweise in Abhängigkeit der Startposition gegeben [Guo08]. Da jede Feinphasenkarte  $\widehat{\phi_{\text{abs}}^c}(x, y)$  unter der Existenz nicht-kontinuierlicher Pfade in sich korrekt verstetigt ist, ist die Differenzbildung zwischen zwei Feinphasenwerten eines als korrespondierend angenommenen Punktpaares hinreichend. Zur Bereitstellung dieses wird das Projektionsmuster in  $(1 + \cos)$ -Form wie auch durch Guo und Huang [Guo08] sowie Gai und Da [Gai09] motiviert, durch einen eindeutigen, aber weitere Verarbeitungsschritte möglichst gering beeinträchtigenden Marker ergänzt. Zahlreiche Simulationen, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll, stellen das in Abbildung 3.6 links veranschaulichte, offene Rechteck als bestgeeignet heraus. Abbildung 3.6 zeigt auf der rechten Seite die Einbettung in eine  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung. Für jede Aufnahme  $g^{c1}$  und  $g^{c2}$  separat wird mithilfe von Templatematching die mittlere Position des Markierungsrechteckes bestimmt. Für die Präzision dieser Bestimmung ist die Zuordnung zu je einer  $(1 + \cos)$ -Periode hinreichend, wie unter anderem durch die Gleichungen im System (3.12) ersichtlich wird. Die Öffnung des Rechteckes begründet sich daraus, dass somit auch im Rechteckinneren eine zuverlässige  $2\pi$ -Verstetigung ermöglicht ist, womit Beeinträchtigungen durch Setzen dieser Markierung minimiert werden können.

Die Wertangleichung der Feinphasenkarten  $\phi_{\text{abs}}$  für die Kameras  $c1$  und  $c2$  erfolgt anschließend durch folgende zwei Vorschriften:

$$\phi_{\text{Diff}} = \left\lfloor \frac{\widehat{\phi_{\text{abs}}^{c1}}(\text{Marker}^{c1}) - \widehat{\phi_{\text{abs}}^{c2}}(\text{Marker}^{c2})}{2\pi} + \frac{1}{2} \right\rfloor \cdot 2\pi \quad (3.12)$$

$$\phi_{\text{abs}}^{c2}(x, y) = \widehat{\phi_{\text{abs}}^{c2}}(x, y) + \phi_{\text{Diff}}$$

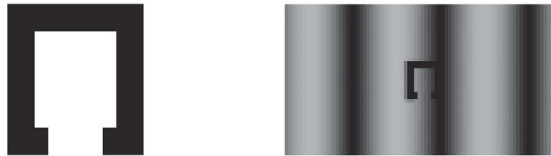


Abbildung 3.6: Einseitig geöffnetes Rechteck (links) als temporäre Objektmarkierung zur Bereitstellung einer definierten 2D-Punktkorrespondenz, sowie dessen Einbettung in eine  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung (rechts).

Unabhängig des globalen Wertebereiches für Feinphasen, sind die vor der  $2\pi$ -Verstetigung ermittelten Rohphasen innerhalb ihrer  $(1 + \cos)$ -Perioden korrekt bestimmt, woran durch Addition oder Subtraktion Vielfacher von  $2\pi$  während des Verstetigungsprozesses nichts verändert wird. Die Anpassung der ohne Beschränkung der Allgemeinheit zweiten Feinphasenkarte  $\widehat{\phi_{\text{abs}}^{c2}}(x, y)$  kann folglich ebenfalls ausschließlich durch  $2\pi$ -Vielfache erfolgen, was in Gleichung (3.12) durch Division und Multiplikation mit  $2\pi$ , sowie dem zwischengelagerten, durch Addition von  $1/2$  und Anwendung der floor-Funktion beschriebenen Rundungsschritt abgebildet ist.

### Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten

Dem Vorhandensein  $2\pi$ -verstetigter und zueinander im Wertebereich angepasster Feinphasenkarten  $\phi_{\text{abs}}^c$  aus zwei verschiedenen Perspektiven  $c = \{c1, c2\}$ , schließen sich zur Bestimmung einer 3D-Punktwolke  $\{O_k\}$  die gleichen Arbeitsschritte an, wie sie auch für statische Messsituationen durchgeführt werden. Aufgrund der Beschränkung der Datenaufnahme zu ausschließlich einem einzigen Zeitpunkt, besteht keine Möglichkeit der Projektion einer zweiten Musterrichtung, so dass die Anwendung von Algorithmen der Epipolargeometrie unumgänglich ist.

#### 3.2.1.5 Phasenverstetigung durch Vergleiche von Bildsegmenten

Wie den Erklärungen in Abschnitt 3.2.1.4 zu entnehmen, lassen sich alle Pixel einer Rohphasenkarte  $\phi_{\text{rel}}$  mit einem definierten Wert korrekt zueinander verstetigen, so lange mindestens ein Verbindungspfad mit Phasendifferenzen  $\Delta\phi < 2\pi$  für jeweils adjazente Pixel existiert. Für Bildbereiche, die eine vollständige Trennung mit  $\min(\Delta\phi) \geq 2\pi$  zu anderen Bildbereichen besitzen, ist eine zuverlässige  $2\pi$ -Verstetigung nach der Methode von Herráez et al. [Her02] nicht gegeben. Auch die in Abschnitt 3.2.1.4 beschriebene Vorgehensweise zur markerbasierten Wertanpassung zwischen den zwei Feinphasenkarten  $\phi_{\text{abs}}^{c1}$  und  $\phi_{\text{abs}}^{c2}$  eines Aufnahmezeitpunktes  $n$  lässt sich für Bildbereiche ohne Marker und der beschriebenen Phasentrennung  $\Delta\phi \geq 2\pi$  nicht korrekt durchführen.

Für diese Fälle ist eine segmentierte Bildbetrachtung unerlässlich. Unabhängig der Art und Weise zur Bestimmung dieser Segmente ist für eine korrekte Wertanpassung der zwei Feinphasenkarten  $\phi_{\text{abs}}$  eines Aufnahmezeitpunktes für jedes Segment ein Marker notwendig, welcher sich innerhalb eines Bildes von allen anderen existierenden Markern signifikant in der Erscheinung unterscheiden muss, um eine eindeutige Markerzuordnung realisieren zu können. Während die Projektion des mindestens einen Markers bereits simultan zum Aufnahmezeitpunkt erfolgt, ist eine Bildsegmentierung erst datenbasiert nachgelagert durchführbar. Somit ist eine geeignete Markerpositionierung innerhalb jedes Segmentes nicht realisierbar. Die alternative Nutzung spezieller Sensoranordnungen, wie von Cong et al. in [Con13] vorgeschlagen, schränkt die Flexibilität des 3D-Messsystems stark ein.

Dieser Abschnitt beschreibt einen neuartigen Ansatz der  $2\pi$ -Verstetigung auf Basis sogenannter Bildsegmentvergleiche. Auf eine Markerintegration in die Projektion kann dabei verzichtet werden.

### Bildsegmentierung

Die Bestimmung von Bildsegmenten ähnlicher Frequenzen und zu anderen Bildbereichen verschiedener Frequenzen erfolgt auf der Basis der Hilbert-Huang-Transformation, wie sie detailliert von Wang und Da in [Wan12] beschrieben ist. Dieses Vorgehen der Bildaufteilung wird ebenso für die im Kapitel 4 mit 2D-AWFTP sowie 2D-AWFT bezeichneten Vergleichsverfahren angewandt. Hauptbestandteil dieser Transformation ist die Zerlegung eines eindimensionalen Signals in so-

genannte instantane Frequenzkomponenten. Gleichzusetzen ist dies im Kontext der Analyse von Interferogrammen hinsichtlich existierender Phasensprünge größer einem Schwellwert. Aufgrund der eindimensionalen Beschränkung der Hilbert-Huang-Transformation wird die Signalzerlegung beziehungsweise der Segmentgrenzenbestimmung zweistufig zunächst entlang der X-Komponente eines jeden Interferogramms  $I_n^c$  und im Anschluss entlang der Y-Komponente durchgeführt.

### Segmentzuordnung zwischen Interferogrammen je eines Aufnahmezeitpunktes

Der beschriebene Vorgang der Untergliederung von Interferogrammen  $I$  in Segmente  $S$  ähnlicher Frequenzen führt zumeist für jede Kameraebene  $c$  zu jedem Aufnahmezeitpunkt  $n$  zu verschiedenen Ergebnissen. Zur Durchführung von Segmentvergleichen mit dem Ziel einer korrekten Rohphasenverstetigung ist eine verlässliche Zuordnung von Segmenten  $S_{k,n}^{c1}$  einer Kameraebene zu Segmenten  $S_{l,n}^{c2}$  der anderen Kameraebene notwendig. Dies erfolgt für jedes Segment  $k$  der ohne Beschränkung der Allgemeinheit ersten Kamerabildebene  $c1$  durch Transformation aller Bildpunkte dieses Segments in die Kamerabildebene  $c2$ . Zur Transformation mithilfe der als bekannt vorausgesetzten intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter wird der zu jeweils einem konkreten Bildpunkt  $(x, y)^{c1}$  gehörende Sehstrahl  $r^{c1}$  verwendet. Seine grundsätzlich unbekannte Länge wird heuristisch durch die Länge des Sehstrahl durch den Schnittpunkt der beiden Kamerahauptstrahlen approximiert. Ein Kamerahauptstrahl definiert sich als Sehstrahl ausgehend vom optischen Zentrum der jeweiligen Kamera durch den Mittelpunkt der zugehörigen Bildebene. Die vereinigte Betrachtung aller transformierten Bildpunkte eines Segments ergibt dessen Transformationsdarstellung  $S_{k,n}^{c1,trans}$ .

Die eigentliche Segmentzuordnung beziehungsweise für beide Kamerabildebene einheitliche Nummerierung erfolgt durch die Kombination von zwei Kriterien. Mit dem ersten Kriterium  $\kappa_1$  wird die überdeckende Fläche eines transformierten Segments  $S_{k,n}^{c1,trans}$  der ersten Kamerabildebene mit den Segmenten  $S_{l,n}^{c2}$  der zweiten Kamerabildebene beschrieben. Das zweite Kriterium  $\kappa_2$  definiert sich über die, durch Kreuzkorrelation bestimmte Formähnlichkeit des jeweils transformierten Segments  $S_{k,n}^{c1,trans}$  zu den Segmenten  $S_{l,n}^{c2}$ . Der höchste Zuordnungswert  $\kappa$  als Produkt beider Kriterien determiniert die konkrete Zuordnung  $S_{k,n}^{c1} \mapsto S_{l,n}^{c2}$ .

### 2 $\pi$ -Rohphasenverstetigung

Den Vorgängen der Bildsegmentierung, sowie der Segmentzuordnung zwischen den beiden Kamerabildebene  $c$  für jeden Aufnahmezeitpunkt  $n$  getrennt, schließt sich die 2 $\pi$ -Verstetigung zur nachgelagerten Bestimmung absoluter 3D-Objektkoordinaten an. Für jedes Bildsegment  $S_{k,n}^c$  jeder Rohphasenkarte  $\phi_{rel}^c$  separat wird dabei zunächst eine 2 $\pi$ -Verstetigung nach dem Prinzip von Herráez durchgeführt. Daran anschließend muss analog zu Abschnitt 3.2.1.4 eine Wertanpassung der absoluten Feinphasen  $\widehat{\phi_{abs}}$  zwischen einander zugeordneten Segmenten  $S_{k,n}^{c1}$  und  $S_{l,n}^{c2}$  mit  $k \mapsto l$  der zwei Kameraansichten  $c1$  und  $c2$  erfolgen. Dies wird durch sogenannte Segmentvergleiche ermöglicht, welche im Folgenden detailliert beschrieben, sowie in Abbildung 3.7 visualisiert sind.

Als Basis der Segmentvergleiche wird analog zur markerbasierten Wertanpassung eine konkrete Punktkorrespondenz zwischen einander zugeordneten Segmenten der zwei Kameraansichten benötigt. Während diese Punktkorrespondenz bei der Verwendung eines Markers durch dessen Mittelpunkt in beiden Ansichten  $c1$  und  $c2$  gegeben ist, muss sie im Segmentierungsfall zunächst ermittelt werden. Hierfür wird ein grundsätzlich beliebiger Bildpunkt des aktuell betrachteten Segmentes ohne Beschränkung der Allgemeinheit der ersten Kamerabildebene ausgewählt. Zur

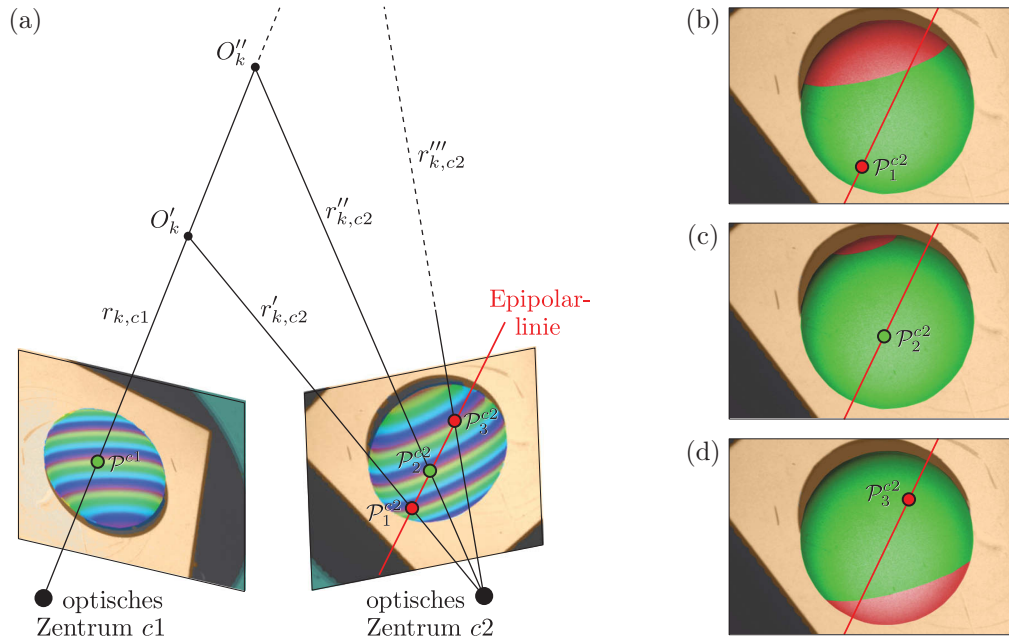


Abbildung 3.7: Ermittlung einer 2D-Punktkorrespondenz basierend auf Korrespondenzkandidaten und Pixelüberlappungen des jeweils betrachteten Segments  $\mathcal{S}$ . (a) Bestimmung von Korrespondenzkandidaten innerhalb der Bildebene  $c2$  zu einem beliebigen Bildpunkt  $\mathcal{P}^{c1}$  anhand der Epipolarlinie (rot), sowie der eindimensionalen Rohphasenverteilung  $\phi_{rel}$  (Farbverlauf über das Kugelsegment). Die Teilabbildungen (b) bis (d) zeigen grün eingefärbt die Segmentüberlappung basierend auf der jeweiligen  $\widehat{\phi_{abs}}$ -Wertanpassung der Korrespondenzkandidaten aus (a). Entsprechend sind rot nicht überlappende Segmentbereiche eingefärbt. Der hinsichtlich der Pixelüberlappung bestpassende Korrespondenzkandidat ist grün markiert; alle weiteren durch einen rot gefüllten Kreis (ähnlich [Mül14]).

Vermeidung von Fehlern und Ausschluss von Bildpunkten, die aufgrund der Beobachtungsperspektive in der anderen Bildebene keine Korrespondenz besitzen, empfiehlt sich eine Bildpunktwahl eher im Segmentinneren und nicht im Randbereich, wie in Abbildung 3.7 (a) veranschaulicht. Dieser gewählte Bildpunkt soll im Folgenden mit  $\mathcal{P}^{c1}$  bezeichnet sein.

Zu  $\mathcal{P}^{c1}$  zugehörig wird der korrespondierende Bildpunkt  $\mathcal{P}_i^{c2}$  in der zweiten Kamerabildebene gesucht. Aufgrund der Dateneinschränkung auf ausschließlich eine eindimensionale Bildpunktbeschreibung durch das projizierte  $(1 + \cos)$ -Grauwertmuster, ist die Nutzung geometrischer Sensoreigenschaften und damit die Anwendung von Epipolargeometrie unumgänglich. Für  $\mathcal{P}^{c1}$  wird in einem ersten Schritt die zugehörigen Epipolarlinie in der Bildebene von Kamera  $c2$  bestimmt. Innerhalb dieses eindimensionalen Suchraums werden mithilfe des relativen Phasenwertes  $\phi_{rel}$  von Bildpunkt  $\mathcal{P}^{c1}$  alle potenziell korrespondierenden Punkte mit dem gleichen relativen beziehungsweise schwellwertbasiert sehr ähnlichen Phasenwert in der Bildebene  $c2$  ermittelt (in Abbildung 3.7 (a)  $\mathcal{P}_1^{c2}$  bis  $\mathcal{P}_3^{c2}$ ). Der Suchraum wird dabei zusätzlich durch die Segmentgrenzen von  $\mathcal{S}_{l,n}^{c2}$  eingeschränkt. Ist ausschließlich ein sogenannter Korrespondenzkandidat vorhanden, erfolgt die Wertanpassung der absoluten Feinphasen zwischen den zugehörigen Segmenten der zwei Kamerabildebenen identisch zur markerbasierten Vorgehensweise. Bei Existenz von mindestens zwei Kandidaten wird der bestpassende im folgend beschriebenen Verfahren über Segmentver-

gleiche als Korrespondenzpunkt bestimmt. Dabei wird das Kriterium „bestpassend“ auch näher definiert.

Die nachfolgenden Schritte werden für jeden Korrespondenzkandidaten der Ebene  $c2$  ausgeführt:

1. Auswahl eines Korrespondenzkandidaten
2. Wertanpassung der nach Herráez  $2\pi$ -verstetigten Feinphasenkarten einander zugehöriger Segmente  $\mathcal{S}_{k,n}^{c1}$  und  $\mathcal{S}_{l,n}^{c2}$  durch Anwendung der Gleichungen (3.12) mit Bezug zu  $\phi_{\text{abs}}(\mathcal{P}^{c1})$
3. Berechnung der dreidimensionalen Objektkoordinaten für alle zum betrachteten Segment  $k$  in  $c1$  beziehungsweise  $l$  in  $c2$  zugehörigen Bildpunkte mit der in Schritt 2 berechneten Feinphasenkarten  $\phi_{\text{abs}}^{c1}(\mathcal{S}_{k,n})$  und  $\phi_{\text{abs}}^{c2}(\mathcal{S}_{l,n})$
4. Projektion der 3D-Objektkoordinaten in die Kamerabildebene  $c2$
5. Bestimmung der Anzahl überlagernder Pixel zwischen der Rückprojektion aus Schritt 4 und der Bildpunktmenge von  $\mathcal{S}_{l,n}^{c2}$

Diese fünf Bearbeitungsschritte werden für alle zu  $\mathcal{P}^{c1}$  ermittelten Korrespondenzkandidaten  $\mathcal{P}_i^{c2}$  durchgeführt. Als endgültiger Korrespondenzpunkt beziehungsweise bestpassend wird derjenige bestimmt, der die größte Anzahl überlagernder Pixel aus Arbeitsschritt 5 besitzt. Im konkret in Abbildung 3.7 visualisierten Beispiel des Kugelsegments zeigt Abbildungsteil (c) die größtmögliche Überdeckung (grün gefärbt) auf, weshalb dieser Korrespondenzkandidat auch grün markiert ist.

Zur Vergrößerung der Differenzen der Überlagerungspixel zwischen den einzelnen Korrespondenzkandidaten kann nach Bräuer-Burchardt et al. [BB14a] eine modifizierte Anordnung der 3D-Sensorkomponenten genutzt werden. Dabei wird neben der Rohphasenverteilung auf der Kamerabildebene  $c2$  zusätzlich die Phasenverteilung der Projektorebene zur Ermittlung von Korrespondenzkandidaten genutzt. Je näher dabei das Projektionssystem an einer Kamera positioniert ist, desto mehr Korrespondenzkandidaten zwischen den beiden Kamerabildebenen entfallen mit Hinzunahme der Betrachtung Kameraebene-Projektorebene. Die verringerte Anzahl verbleibender Kandidaten ist aus geometrischen Gründen bedingt auch untereinander weiter getrennt, was die Eindeutigkeit der Anzahl an überlagernden Pixeln aus Schritt 5 der vorherigen Vorgehensbeschreibung signifikant erhöht.

### 3.2.1.6 Lokale Frequenzanalyse mit verschiedenen, datengetriebenen Fenstergrößen

Insbesondere für Messobjekte oder Objektszenen mit komplexer 3D-Struktur gestaltet sich der Schritt der Frequenzfilterung sehr anspruchsvoll. Dies ist durch das Vorhandensein zahlreicher unterschiedlicher Frequenzen, auch im langwelligen Bereich begründet, so dass keine harte Grenze zwischen dem ersten Frequenzpeak, sowie dem Gleichlichtanteil bestimmbar ist. Zur Vereinfachung des Frequenzspektrums empfiehlt sich daher nach Djurović und Stanković [Dju03], sowie Zhong und Zeng [Zho07] die Unterteilung der jeweiligen Eingabebilder  $g^c$  in Bereiche ähnlicher Frequenzverteilungen. Die einfachste Variante der Umsetzung ist dabei die gleichmäßige Bildteilung in möglichst quadratische Bereiche, wie sie schematisch in Abbildung 3.8 mithilfe eines durchgängigen Quadrates dargestellt ist. Für ein Eingabebild  $g^c$  der Größe  $768 \times 768$  Pixel empfiehlt sich beispielhaft eine Achtelung in  $96 \times 96$  Pixel große Einzelbilder. Für noch kleinere Teilbilder ist die Aussagekraft des jeweils zugehörigen Frequenzspektrums und damit das Filterdesign zunehmend schwieriger. Eine Gegenüberstellung verschiedener Ansätze der fensterbasierten Analyse von Interferogrammen ist [Hua10] zu entnehmen.



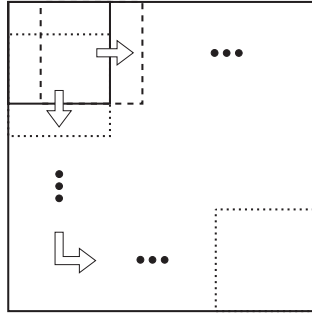


Abbildung 3.8: Schema der Bildunterteilung für eine einfache, fensterbasierte Frequenzfilterung (2D-WFT), inklusive der durch gestrichelte Linien angedeuteten Darstellung fortlaufender Fensterverschiebungen.

Aufgrund der Vorgehensweise bei und den Eigenschaften der Fouriertransformation entstehen an den Rändern des jeweils betrachteten (Teil-)Bildes Artefakte. Diese Fehler führen insbesondere bei der Unterteilung des Eingabebildes zu harten Kanten und Phasen-Artefakten an den Teilbildgrenzen und damit in wesentlichen Bereichen der Objektrekonstruktion. Zum Umgehen dieses Nachteils bietet sich eine Mehrfachbestimmung von Phasenwerten  $\phi$  für jede Bildkoordinate  $(x, y) \in \mathbb{N}^2$  an. Hierzu wird das ohne Beschränkung der Allgemeinheit quadratische Fenster der Größe  $m \times m$  um eine bestimmte Pixelanzahl  $k \in \mathbb{N}$  mit  $0 \ll k \ll m$  in einer Richtung versetzt. Von dem Bildrand der Breite  $k$  Pixel abgesehen, werden mit diesem Vorgehen sukzessive für jeden Bildpunkt  $(x, y)$  mindestens zwei, maximal  $\left(\frac{m}{k}\right)^2$  Rohphasenwerte  $\phi_{\text{rel}}^c(x, y)$  ermittelt. Eine Reduktion auf genau einen Wert pro Bildpunkt durch Bestimmung des arithmetischen Mittels scheidet aufgrund der Mitbetrachtung von Fehlerwerten aus, so dass an dieser Stelle die Verwendung des Median empfohlen und für die Ergebnisermittlung in den Kapiteln 4 und 5 verwendet wird.

Die einzelnen Arbeitsschritte der fensterbasierten Frequenzfilterung 2D-WFT sind damit:

1. Unterteilung des Eingabebildes  $g^c$  in gleichgroße, möglichst quadratische Einzelbilder  $g_{\text{Teil}}^c$
2. Bestimmung der Rohphasenwerte  $\phi_{\text{rel}}$  für den Bereich des (ersten) Einzelbildes durch Hamming-Filterung, Fouriertransformationen, Frequenzfilter, inverser Fouriertransformation, sowie der Rohphasenbestimmung mit dem Zusammenhang aus Gleichung (3.4)
3. Verschiebung des Einzelbildfensters um  $w$  Pixel in einer Richtung, sowie Fortfahren mit Schritt 2.
4. ist die Fensterverschiebung in einer Bildrichtung nicht weiter möglich, wird einmal um  $w$  Pixel in die zweite Dimension verschoben und mit Schritt 2. fortgefahren
5. ist das Bild vollständig, ohne Beschränkung der Allgemeinheit von oben links nach unten rechts mit den in den Punkten 2. bis 4. beschriebenen Schritten durchlaufen, wird für jeden Bildpunkt  $(x, y)$  der Median aus allen an dieser Koordinate bestimmten Rohphasenwerten  $\phi_{\text{rel}}^c(x, y)$  ermittelt
6. alle weiteren Bearbeitungsschritte ( $2\pi$ -Verstetigung, Anpassung der Wertebereiche der Feinphasen zwischen verschiedenen Ansichten  $c$ , Bestimmung von 3D-Koordinaten durch Triangulation mithilfe der Epipolargeometrie) werden analog zum Vorgehen in Abschnitt 3.2.1.4 durchgeführt

### 3.2.2 Bestimmung von 6D-Bewegungsvektoren

Dynamische Messszenarien sind gegeben bei

- Bewegung des Messobjektes während  $T_{\text{Seq}}$ ,
- Bewegung des in sich statischen 3D-Sensorkopfes, grundsätzlich bestehend aus einem Projektionssystem und zwei Kameras, während  $T_{\text{Seq}}$ , sowie
- voneinander unabhängigen Bewegungen von Messobjekt und 3D-Sensorkopf.

Zur Detektion von Bewegung  $v_{\text{rel}}$  und der damit verbundenen Ermittlung von Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$ , ist zwingend ein während  $T_{\text{Seq}}$  statisches Koordinatensystem notwendig. Als Koordinatensysteme kommen dabei die der beiden Kameras  $\text{KOS}^{c1}$  und  $\text{KOS}^{c2}$ , das  $\text{KOS}^p$  des Projektionssystems, sowie ein theoretisch existierendes, sogenanntes Weltkoordinatensystem  $\text{KOS}^{\text{Welt}}$ , wie bereits in Abbildung 1.4 visualisiert, infrage. Üblicherweise erfolgt die Bestimmung beziehungsweise Darstellung dreidimensionaler Objektkoordinaten  $O_k$  in Bezug zu der Masterkamera. Welche der beiden Kameras im 3D-Sensorkopf als Master angesehen wird, besitzt keinen Einfluss auf das Ergebnis. Während für statische Messsituationen, sowie den Fall der ausschließlichen Messobjektbewegung ein fester Zusammenhang zwischen dem Koordinatensystem der Masterkamera und dem Weltkoordinatensystem existiert, ist dies für die Fälle eines bewegten Sensorkopfes während  $T_{\text{Seq}}$  nicht mehr gegeben. Die absolute Lage des Messobjektes im Raum des Weltkoordinatensystems ist daher nicht bestimmbar.

Für die im nachfolgenden Abschnitt 3.3 beschriebenen Algorithmen ist keine Kenntnis der absoluten Lage in Bezug zum Weltkoordinatensystem notwendig. Grundsätzlich werden eine Messanordnung, zumeist die zum ersten Aufnahmezeitpunkt  $n = 1$ , als Referenz betrachtet und weitere Veränderungen während  $T_{\text{Seq}}$  ausschließlich durch Relativbewegungen  $v_{\text{rel}}$  beschrieben. Hierbei ist es auch unerheblich, welches der drei vorgenannten Messszenarien dieser Relativbewegung unterliegt.

Die Bestimmung der Relativbewegung  $v_{\text{rel}}$  zwischen verschiedenen Aufnahmezeitpunkten  $n \in T_{\text{Seq}}$  erfolgt auf Basis der wie im Abschnitt 3.2.1 ermittelten „groben“ 3D-Punktwolken, die Abbildung je eines Aufnahmezeitpunktes  $n$  sind. Grundlegend ist dabei der sogenannte ICP-Ansatz. Die Abkürzung ICP steht für „iterative closest points“ und beschreibt Algorithmen, die unter automatischer Exklusion von als Ausreißer betrachteten Datenpunkten die globale, sechs-dimensionale Transformation bestimmen, bei der die Summe der euklidischen Distanzen zwischen beiden betrachteten Punktmengen minimal ist. Da die Konvergenz zum nächstgelegenen Minimum für ICP-Algorithmen in jedem Fall gegeben ist [Bes92], bietet sich sowohl zur Suche des korrekten Minimums, als auch zur Beschleunigung der Berechnungen die Verwendung einer hinreichend guten Startlösung für die 6D-Transformation  $T^{6D}$  an. Diese kann zu Beginn einer Messsequenz als Einheitsmatrix  $E_{3,4}$  initialisiert werden, im weiteren Sequenzverlauf bietet sich unter der Annahme einer approximativ linearen Bewegung eine Propagation zuvor berechneter Transformationsmatrizen  $T_{n-i}^{6D}$  mit  $i \in [1, 2, \dots, n-1]$  an.

Im Folgenden ist eine Auswahl von Verfahren kurz beschrieben, welche auf der Anwendung von ICP basieren und in Teilen Weiterentwicklungen beziehungsweise numerische Beschleunigungen aufzeigen. So beschreiben unter anderem Besl und McKay in [Bes92] eine Herangehensweise der Erstellung einer Datenbank mit initialen Rotations- und Translationsparametern für typische Objekte und Objektteile mit durchschnittlicher Oberflächenkomplexität. Diese Datenbank wird erschöpfend für Startlösungen verwendet und beschleunigt damit den Registrierungsprozess von



Freiformobjekten mit allen sechs Freiheitsgraden – drei Rotations- und drei Translationsparameter. Des Weiteren werden neben dem Nachweis der ICP-Konvergenz Registrierungsergebnisse auf den Repräsentationsebenen Punktmengen, Kurvensegmente und Objektoberflächen gegeben.

Zhang beschreibt in [Zha94] einen pseudo-iterativen Vorgang zur Registrierung von Freiformkurven und Oberflächen auf Einzelpunktbasis. Dabei werden einzelne Punktmengen als Teil der zwei betrachteten 3D-Punktwolken zueinander in Verbindung gesetzt, wenn die zugehörigen Punkte ein zuvor festgelegtes Abstandsmaß unterschreiten und die Oberflächennormalen ähnlich zueinander sind. Die zueinander in Verbindung gesetzte Punktmenge wird während dieses Vorgangs stetig größer, was als pseudo-iterativer Vorgang bezeichnet wird.

Mit [Pul99] von Pulli und [Che91] von Chen und Medioni wurden zwei Ansätze zur Registrierung einer Vielzahl an 3D-Punktwolken vorgestellt. Das Ziel dabei ist, eine möglichst vollständige, dreidimensionale Repräsentation makroskopischer Objekte zu ermitteln ohne dabei durch iteratives Vorgehen Fehlerpropagationen akzeptieren zu müssen. Da diese Herangehensweise für das Vorgehen in dieser Arbeit, der Registrierung von jeweils zwei 3D-Punktwolken  $\{O_{k,n}\}$  als Ergebnis der Bilddatenanalyse aufeinander folgender Aufnahmezeitpunkte nicht notwendig ist, aber für den Vergleich zwischen bewegungskompensierenden und Mehransichten-verbindenden Algorithmen, sogenannten *Matching*-Verfahren, in Abschnitt 4.7 benötigt wird, soll eine Beschreibung im Detail auf den entsprechenden Ergebnisabschnitt zurückgestellt werden.

Zur Registrierung  $T^{6D}$  „grober“, aber in ihrem Erscheinungsbild und ihrer Raumlage sehr ähnlicher 3D-Punktwolken als Analyseergebnis von Bilddaten  $I_n$  je eines Aufnahmezeitpunktes, wie sie beispielhaft in Abbildung 3.9 (a) und (b) dargestellt sind, soll in dieser Arbeit die existierende und frei verfügbare Implementierung des ICP-Algorithmus von Geiger et al. namens „libicp - Library for Iterative Closest Point Matching“ Verwendung finden. Eine beispielhafte

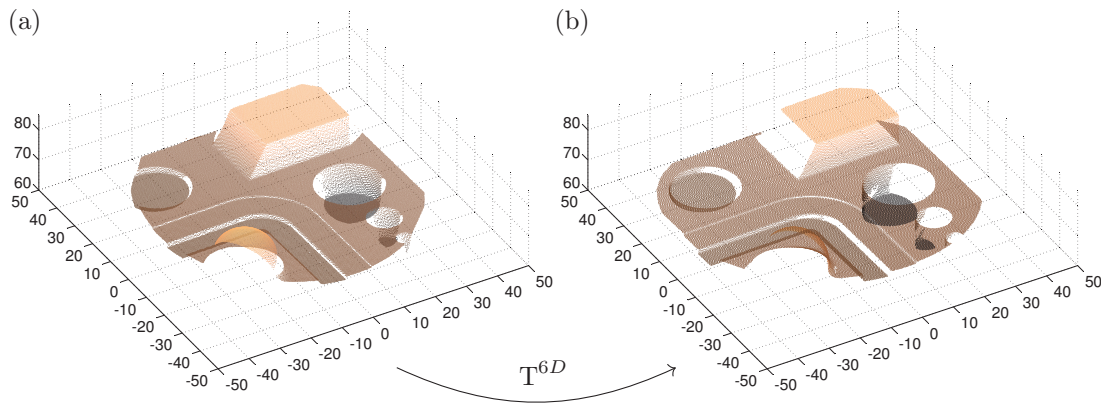


Abbildung 3.9: Zwei dreidimensionale Punktwolken des Messobjektes „geometrische Formen“, welche aus Daten des Tischdigitalisierers „kolibri hiScanr“ [Küh08] mit leicht unterschiedlichen Blickwinkeln, sowie einer jeweils *vollständigen Mustersequenz* bestimmt wurden. Eine vollständige Mustersequenz umfasste dabei 48 Einzelmuster: Vorgelagert zwei sogenannte Hell- und Dunkelbilder, sieben Gray-Code-Muster, 16  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen, sowie zwei um 90 Grad zueinander rotierte Projektionsrichtungen. Die Farbcodierung entspricht der Höhenverteilung des 3D-Ergebnisses.

Anwendung dessen ist [Gei12] zu entnehmen. Sollte die konkrete Anwendung im Verhältnis zur Zeitspanne zwischen zwei Bildaufnahmen  $n$  und  $n+1$  große Relativbewegungen  $v_{\text{rel}}$  beinhalten, ist ein vorgeschalteter Prozess der Grobausrichtung anzuwenden, wie durch Bonarrigo et al. [Bon12] vorgeschlagen. Für zeitkritische Anwendungen empfiehlt sich eine Beschleunigung, wie sie unter anderem von Pezzotti et al. [Pez12] beschrieben ist.

### 3.3 Bewegungskompensation

In den beiden vorangegangenen Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 wurden Methoden und Algorithmen zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten auf Basis eines Aufnahmezeitpunktes, sowie die räumliche Positionsveränderung dieser Koordinaten von Zeitpunkt zu Zeitpunkt beschrieben durch 6D-Vektorfelder aufgezeigt. Diese Daten gilt es im Weiteren zu einer möglichst präzisen Kompensation der relativen Bewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor zu nutzen.

#### 3.3.1 Bestimmung von 2D-Punktkorrespondenzen

Die Bestimmung von Punktkorrespondenzen zwischen Positionen von mindestens zwei Kamerasensorebenen basiert auf dem Vergleich von Merkmalsvektoren, die diese Punkte näher beschreiben. Im konkreten Ansatz der Phasogrammetrie werden sogenannte Feinphasen  $\phi_{\text{abs}}(x, y)$  als Merkmalsvektoren verwendet, deren Bestimmung im Allgemeinen, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, das Vorhandensein mehrerer Intensitätsverläufe in  $(1 + \cos)$ -Form voraussetzt. Wird für verschiedene Zeitpunkte  $t \in T_{\text{Seq}}$  die Abbildung ein und desselben Objektpunktes  $O_k$  auf verschiedene Sensorpositionen  $(x_i, y_i)_n^c$  durchgeführt, ist die Punkt beschreibende Aussage der Feinphase  $\phi_{\text{abs}}(x, y)$  nicht mehr gegeben beziehungsweise verfälscht. Der Feinphasenwert  $\phi_{\text{abs}}(x, y)$  beschreibt jetzt Eigenschaften mehrerer Objektpunkte  $O_k$ , wie bereits in Abbildung 1.1 beispielhaft verdeutlicht. Dabei gilt für die Mengen der je Sensorposition beschriebenen Objektpunkte

$$\{O_k\}^{c1} \neq \{O_k\}^{c2} \quad \text{mit} \quad \{O_k\}^{c1} \mapsto (x_i, y_i)^{c1} \quad \text{und} \quad \{O_k\}^{c2} \mapsto (x_j, y_j)^{c2},$$

wobei für den statischen Fall der 3D-Objektvermessung  $(x_i, y_i)^{c1}$  zu  $(x_j, y_j)^{c2}$  korrespondierend wäre. Die Abbildung eines dreidimensionalen Objektpunktes auf einen zweidimensionalen Bildpunkt des Kamerasensors  $c_i$  mit  $i \in \{1, 2\}$  wird dabei formal durch  $\mapsto$  ausgedrückt.

Die Wiederherstellung der eindeutigen Beschreibung von Objektpunkten durch 2D-Sensorpunkte verschiedener Kameraansichten setzt bei relativer Bewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor während  $T_{\text{Seq}}$  die Kenntnis der jeweiligen Position der Abbildung eines jeden Objektpunktes  $O_k$  auf dem Sensorchip zu allen Zeitpunkten  $t \in T_{\text{Seq}}$  voraus. Ist diese jeweilige Positionsänderung bekannt, lassen sich alle Intensitätsbilder  $I_n^c$  der gesamten Sequenzlänge  $T_{\text{Seq}}$  passgenau (deformiert) übereinander legen. Innerhalb dieser über eine Messsequenz angepassten Intensitätsbilder  $\overline{I}_n^c$  entsprechen alle Pixelpositionen  $(x, y)^c$  jeweils Abbildungen ein und desselben 3D-Objektpunktes  $O_k$ . Die entsprechenden Grauwerte können damit zur Bestimmung der Punkt beschreibenden Merkmalsvektoren  $\phi_{\text{abs}}$  unter anderem nach Gleichung (3.4) inklusive einer  $2\pi$ -Verstetigung herangezogen werden. Die Basis zur Korrespondenzsuche zwischen Sensorpositionen verschiedener Kameraansichten  $c$  mit anschließender Möglichkeit der Triangulation ist mit diesem Vorgehen wiederhergestellt.

### 3.3.2 Lokale Abhängigkeit zwischen $(1 + \cos)$ -Phasenschieben und dem 3D-Profil des Messobjektes

Für dreidimensionale Objektvermessungen unter dem Einfluss relativer Bewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor sind neben Anpassungen der Intensitätsbilder  $I_n$  auch Änderungen am Parameter des Eingabephasenschiebens  $\Delta\phi_{R_n}$  notwendig. Gleichung (1.2) setzt die a priori Kenntnis dieses Wertes für jeden Bildpunkt voraus. Für den statischen Messansatz lässt sich der Phasenschub für jeden beleuchteten Objektpunkt  $O_k$  zwischen je zwei Aufnahmezeitpunkten trivial bestimmen, da der Zusammenhang  $\Delta\phi_{R_n}(x, y)^p = \Delta\phi_{R_n}(O_k)$  gilt. Die Koordinatenangabe  $(x, y)^p$  mit oberem Index  $p$  spiegelt dabei einen Bildpunkt auf der Projektorebene wider, wobei an dieser Stelle und im Folgenden die Chipfläche innerhalb des verwendeten Projektionssystems als Projektorebene bezeichnet werden soll.

Findet während der Zeitspanne der Musterprojektion  $T_{\text{Seq}}$  eine Relativbewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor beziehungsweise dem Projektionssystem statt, ist keine feste Zuordnung zwischen Projektorpunkten  $(x, y)^p$  und Objektpunkten  $O_k$  gegeben. Für jeden 3D-Punkt des Messobjektes ist damit der Phasenschub  $\Delta\phi_{R_n}$  zwischen einzelnen Zeitpunkten  $t$  unbekannt. Eine Bestimmung ist ausschließlich datengetrieben über die zugehörigen Intensitätsbilder  $I_n$  möglich. Zur globalen Bestimmung bietet sich das unter anderem von [Far92] und [Not93] beschriebene, sogenannte Verfahren des Ellipsenfittings an. Verschiedene Ausgestaltungen, sowie ein Vergleich derer ist den zwei Teilveröffentlichungen „Ellipse fitting for interferometry“ in [Col14] und [Wat14] zu entnehmen.

Grundsätzlich werden beim Ellipsenfittings zwei  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen, auch *Interferogramme* genannt, analog zu Gleichung (1.2) wie folgt repräsentiert:

$$\begin{aligned} I^O(x, y) &= a_1 + b_1 \cdot \cos[\phi(x, y)] \\ I^P(x, y) &= a_2 + b_2 \cdot \cos[\phi(x, y) + \Delta\phi_{R_n}] \end{aligned} \quad (3.13)$$

Die ortsabhängige Phase  $\phi(x, y)$  lässt sich zwischen den beiden mit  $I^O$  für das Originalinterferogramm und  $I^P$  als phasenverschobenes Interferogramm bezeichneten Intensitätsverteilungen gleichsetzen, womit sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$\frac{(I^O - a_1)^2}{b_1^2} + \frac{(I^P - a_2)^2}{b_2^2} - 2 \cos(\Delta\phi_{R_n}) \frac{(I^O - a_1)(I^P - a_2)}{b_1 b_2} = \sin^2(\Delta\phi_{R_n}) \quad (3.14)$$

In verkürzter Darstellungsweise  $(I^P)^2 + A \cdot I^O \cdot I^P + B \cdot (I^O)^2 + C \cdot I^O + D \cdot I^P + E = 0$  spiegelt Gleichung (3.14) eine Ellipsengleichung wider, womit sich der gesuchte Phasenschub  $\Delta\phi_{R_n}$  wie folgt bestimmen lässt:

$$\Delta\phi_{R_n} = \arccos\left(-\frac{A}{\sqrt{4 \cdot B}}\right) \quad (3.15)$$

Grafisch äquivalent zur mathematisch formalen Darstellung lässt sich der Zusammenhang in einem zweidimensionalen Diagramm wie in Abbildung 3.10 veranschaulichen, bei dem die Paare an Intensitätswerten  $(I^O(x, y), I^P(x, y))$  jeweils gleicher Pixelpositionen eingetragen werden. An diese Punktverteilung wird bestmöglich eine geschlossene Kurve in Ellipsenform angepasst. Der gesuchte Phasenschub bestimmt sich dann über das doppelte Längenverhältnis der beiden Halbachsen zueinander:

$$\Delta\phi_{R_n} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{\text{kurze Halbachse}}{\text{lange Halbachse}}\right) \quad (3.16)$$

Diese Art der Phasenschubbestimmung beschränkt sich auf eine globale Anwendung beziehungsweise die Anwendung für große Bildteile, da mit sinkender Anzahl an Paaren von Intensitätswerten

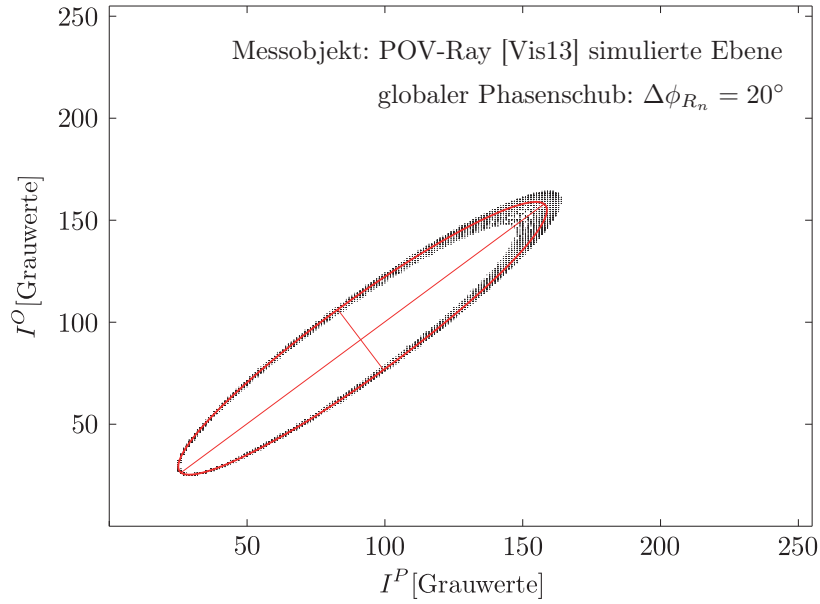


Abbildung 3.10: Beispielhafte Darstellung der grafischen Bestimmung des globalen Phasenschubs  $\Delta\phi_{R_n}$  zwischen zwei Interferogrammen. Jeder schwarze Punkt symbolisiert dabei ein Tupel aus Intensitätswerten der gleichen Pixelposition  $(x, y)$  der beiden Interferogramme  $I^O$  und  $I^P$ . Die bestmöglich an diese Punktverteilung angepasste Ellipse ist inklusive ihrer Haupt-, sowie Nebenachse rot dargestellt.

$(I^O(x, y), I^P(x, y))$  der Fehler des bestimmten Phasenschubs steigt. Bei Betrachtung von nicht senkrecht zur Oberfläche des Messobjektes verlaufenden Projektorstrahlengängen wird ersichtlich, dass der Phasenschub  $\Delta\phi_{R_n}$  von der Entfernung  $d(O_k)$  des jeweils betrachteten Objektpunktes  $O_k$  zur Projektorebene abhängt. Für statische Messvorgänge sind diese Entfernungen über die gesamte Zeit der Musterprojektion  $T_{\text{Seq}}$  unverändert, der  $\Delta\phi_{R_n}$ -Wert steht damit ausschließlich in Zusammenhang mit dem Phasenschub auf der Projektorebene. Im Fall relativer Bewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor variieren die Entfernungen  $d(O_k) \forall k$ . Ausnahmen bilden hierbei planare Objektflächen, die sich parallel zur Projektorebene befinden und über  $T_{\text{Seq}}$  ausschließlich translatorisch bewegen, wie in Abbildung 3.11 exemplarisch gezeigt.

Zur Bestimmung des lokalen Phasenschubs wird im Folgenden ein Algorithmus beschrieben, der auf a priori bekannten, sowie bereits berechneten Daten basiert. Ausgehend von jedem wie in Abschnitt 3.2.1 bestimmten 3D-Objektpunkt  $O_k$  wird mithilfe der Kalibrierwerte des Projektionssystems, die Strahlherkunft der Objektpunktbeleuchtung auf der Projektorebene  $(x, y)^P$  (subpixelgenau) ermittelt. Dieses Vorgehen erfolgt für jeden Zeitpunkt  $t$ . Die dreidimensionale Positionsänderung jedes Objektpunktes ist mit der Bestimmung der 6D-Bewegungsvektoren, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, ebenfalls determiniert. Die Phasenverteilung auf der Projektorebene ist für jeden Zeitpunkt  $t$  bekannt, so dass zwischen je zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten der Phasenschub in Abhängigkeit des betrachteten Objektpunktes  $\Delta\phi_{R_n}(O_k)$  durch Differenzbildung berechnet werden kann. Da die Feinphasenbestimmung auf Koordinaten der Kamerabildebene  $(x, y)^c$  basiert, muss des Weiteren die Zuordnung zwischen den Objektpunkten  $O_k$  und diesen Koordinaten bestimmt werden. Dies erfolgt analog zur Ermittlung der Koordinaten  $(x, y)^P$  durch eine 3D-auf-2D-Projektion in jede Kamerabildebene unter Zuhilfenahme der Systemkalibrierung und der 3D-Punktwolken als Ergebnisse der stereobasierten Einzelbildanalysen (SSSA).

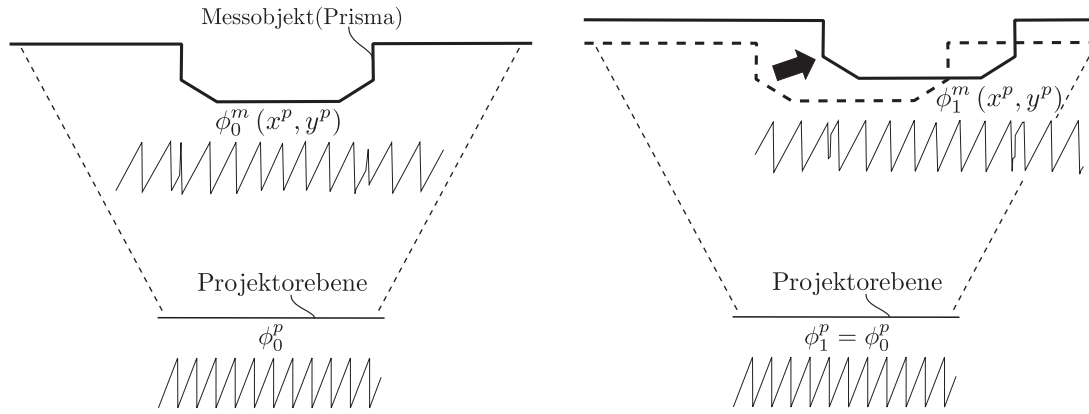


Abbildung 3.11: Visualisierung lokaler Änderungen des Phasenschubs  $\Delta\phi_{R_n}$  zwischen zwei Zeitpunkten  $n = 0$  (links) und  $n = 1$  (rechts). Zur besseren Veranschaulichung der Änderungen ist zu beiden Zeitpunkten  $n$  dieselbe Intensitätsverteilung projiziert  $\phi_0^p = \phi_1^p$ . Die Differenz der beiden Phasenverteilungen im Messraum  $m$  in Bezug zu Positionen auf der Projektorebenen  $(x^p, y^p)$  ist zwischen  $\phi_0^m$  und  $\phi_1^m$  allerdings nicht global identisch, sondern lokal von der Differenz zwischen Messobjekt und Sensor abhängig (ähnlich [Bre12d]).

### 3.3.3 Beleuchtungsvariation

Zusätzlich zum lokal veränderlichen Phasenschub variiert für Messvorgänge mit relativer Bewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor während  $T_{\text{Seq}}$  die Beleuchtung in der Messszene – sowohl objektbedingt, als auch von den Umgebungsparametern. Es gilt daher mit Blick auf die formale Beschreibung eines jeden einzelnen Interferogramms  $I_n^c$  wie in Gleichung (1.2) die Bestimmung der Parameter  $a(x, y)$  und  $b(x, y)$ . Dabei ist die Veränderung dieser beiden Parameter von Zeitpunkt zu Zeitpunkt unter anderem aufgrund unterschiedlicher Einstrahlwinkel der Musterprojektion auf verschiedene Objektteilbereiche nicht global einheitlich, wie den Ausführungen der folgenden Unterabschnitte entnommen werden kann. Die Bestimmung durch Ansätze wie das im vorangegangenen Abschnitt 3.3.2 beschriebene Ellipsenfitting scheidet daher auch in diesem Fall aus.

#### 3.3.3.1 Randabfall der Projektionshelligkeit

Unabhängig der konkreten Intensitätsverteilung eines jeden Projektionsmusters besitzen Projektionssysteme eine differenzierte Verteilung der Leuchtdichte über das projizierte Bild hinweg. So ist aufgrund von Abbildungsfehlern in der Projektionsoptik, sowie der Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle insbesondere zum Projektionsrand und noch stärker ausgeprägt den Ecken des beleuchteten Bereiches ein signifikanter Abfall der Leuchtdichte zu messen. Für statische Messvorgänge, bei denen innerhalb der Sequenz aus Projektionsmustern zusätzlich ein sogenanntes Hellbild mit vollständig weißer Projektion Verwendung findet, können diese Fehler gemessen und ausgeglichen werden. Im Fall dreidimensionaler Messungen in Bewegung ist die Anwendbarkeit dieses Vorgehens nicht gegeben, so dass eine mögliche Hellbildprojektion ausgelassen werden kann. Die lokalen Parameter des Intensitätsabfalls müssen direkt aus dem Datenmaterial der jeweiligen Interferogramme  $I_n^c$  bestimmt werden.

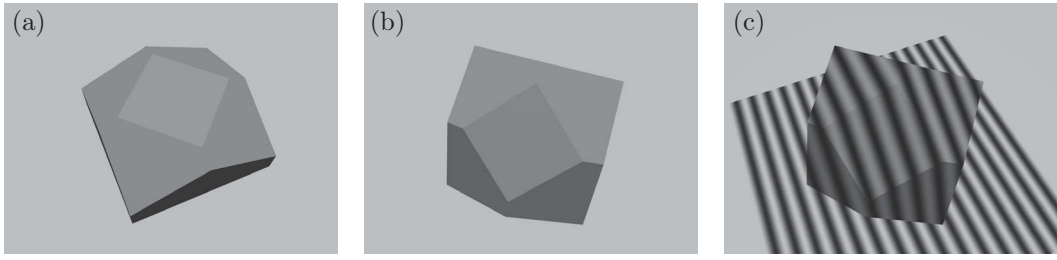


Abbildung 3.12: Simulationsbeispiel eines sich um die XZ-Achse drehenden prismatischen Messkörpers (aus [Bre13]). Die verschiedenen Objektbeleuchtungen lassen sich aus den zu verschiedenen Zeitpunkten entstandenen Intensitätsbildern ablesen. Zur besseren Veranschaulichung wurde bei den in (a) und (b) dargestellten Bildern die Musterprojektion ausgelassen. Abbildung (c) entspricht dem Aufnahmezeitpunkt von (b) mit aktiver Projektion in  $(1 + \cos)$ -Form.

### 3.3.3.2 Modulationsänderungen der Beleuchtung durch Objektbewegung

Im allgemeinen, statischen Messansatz zur Gewinnung dreidimensionaler Objektkoordinaten kann von konstanten Beleuchtungsparametern ausgegangen werden, so dass die gesuchten Roh-  $\phi_{\text{rel}}(x, y)$  beziehungsweise Feinphasen  $\phi_{\text{abs}}(x, y)$  ausschließlich mithilfe aufgenommener Intensitätsbilder  $I_n$ , sowie dem bekannten Phasenschub  $\Delta\phi_{R_n}$  aus einer Messsequenz heraus bestimmt werden können, wie es beispielhaft mit vier Messzeitpunkten in Gleichung (3.1) dargestellt ist. Unter bei relativer Objektbewegung gegebener und damit zwingender Mitbeachtung veränderlicher Beleuchtungsparameter wie in Abbildung 3.12 muss ein generalisierter Berechnungsansatz Anwendung finden, wie er durch Farrell und Player 1992 in [Far92] vorgestellt wurde. Diese Herangehensweise beschränkt sich allerdings auf globale Herleitungen, sowie globale Nutzungen der Parameter  $a_n^c$  und  $b_n^c$ , so dass für eine pixelweise Änderung der Beleuchtungsparameter ein erweiterter generalisierter Ansatz gefunden werden muss. Eine entsprechende Frequenzfilterung unter Zuhilfenahme der Fouriertransformation ist grundsätzlich möglich, liefert aber den Erkenntnissen in Abschnitt 4.5.1 folgend, schlechtere Ergebnisse als das im Folgende beschriebene Verfahren.

Für die lokale Bestimmung der Modulation innerhalb eines Interferogramms soll auf die allgemeine Herleitung der Rohphasenermittlung bei bekanntem Phasenschub zurückgegriffen werden, welche [Kre96, Abschnitt 4.5.2] entnommen werden kann. Darin wird unter anderem ein lineares Gleichungssystem aufgestellt, welches unter Kenntnis von Interferogrammen, sowie dem Phasenschub zwischen je zwei Aufnahmen die Umgebungsbeleuchtung  $a$ , sowie zwei Parameter  $u$  und  $v$  genannt als Lösungsvektor besitzt. Mithilfe der beiden letztgenannten Parameter  $u$  und  $v$  lässt sich zum einen die gesuchte Rohphase  $\phi_{\text{rel}}$  ermitteln. Zum anderen wird die Modulation der Intensitätsverteilung durch den folgenden Zusammenhang bestimmt [Kre96, Abschnitt 4.5.4]:

$$b(x, y) = \sqrt{[u(x, y)]^2 + [v(x, y)]^2} \quad (3.17)$$

Das angesprochene, lineare Gleichungssystem besitzt dabei folgende Struktur, mit  $m$  der jeweiligen Anzahl der Summanden:

$$\begin{pmatrix} m & \sum \cos \Delta\phi_{R_n} & \sum \sin \Delta\phi_{R_n} \\ \sum \cos \Delta\phi_{R_n} & \sum \cos^2 \Delta\phi_{R_n} & \sum \sin \Delta\phi_{R_n} \cdot \cos \Delta\phi_{R_n} \\ \sum \sin \Delta\phi_{R_n} & \sum \sin \Delta\phi_{R_n} \cdot \cos \Delta\phi_{R_n} & \sum \sin^2 \Delta\phi_{R_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum \bar{I}_n \\ \sum \bar{I}_n \cdot \cos \Delta\phi_{R_n} \\ \sum \bar{I}_n \cdot \sin \Delta\phi_{R_n} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$



Der Übersichtlichkeit halber wurde auf den Bildpunktbezug durch  $(x, y)$  bei jedem Parameter (außer  $m$ ) verzichtet. Des Weiteren sind der Anwendung des dreidimensionalen Objektvermessens in Bewegung, sowie den Ausführungen in Abschnitt 3.3.1 entsprechend, die Intensitätsbilder  $I_n^c$  durch die bewegungskompensierten Bilddaten  $\overline{I}_n^c$  ersetzt.

Für eine eindeutige Lösung des Spaltenvektors  $(a, u, v)^T$  werden mindestens drei voneinander unabhängige Wertepaare  $(\overline{I}_n^c(x, y), \Delta\phi_{R_n}^c(x, y))$  benötigt. Dem widerspricht allerdings die für Messszenen mit Bewegung notwendige Annahme, dass Beleuchtungsparameter für jeden Bildpunkt  $(x, y)^c$  zu jeder Bildaufnahme  $n$  benötigt werden und veränderlich sind. Zur Auflösung dieses Widerspruchs und damit zur Bereitstellung von Matrizen mit vollem Rang für Gleichungssystem (3.18) wird jeder Bildpunkt in Verbindung mit seiner Umgebung betrachtet. Für die Größe der Umgebung gilt dabei:

- eine Vergrößerung der Umgebung reduziert durch die Überbestimmtheit die Fehleranfälligkeit der Beleuchtungsbestimmung, da sowohl die Intensitätswerte durch Rauscheinflüsse, als auch der Phasenschub aufgrund seiner Berechnungsweise fehlerbehaftet sind
- für die betrachtete Umgebung wird die Annahme getroffen, dass die Beleuchtungsparameter für alle inkludierten Bildpunkte approximativ gleich sind

Insbesondere der zweite Punkt ist für stark ausgeprägte 3D-Strukturen des Messobjektes, wie unter anderem Kanten- und Eckpunkte nicht gegeben. Daher empfiehlt sich die Verwendung einer datengetriebenen, adaptiven Größe der Bildpunktumgebung basierend auf der Gradientenvarianz der konkreten Umgebung.

Ein vollständiger Algorithmus zur Bestimmung der Beleuchtungsparameter  $a_n^c(x, y)$  und  $b_n^c(x, y)$  unter Nutzung eines schwellwertbasiert maximalen Bereiches an Bildpunkten der Umgebung der jeweils betrachteten Bildposition  $(x, y)$  ist in Algorithmus 3.1 als Pseudocode aufgezeigt. Als Eingabeparameter werden ausschließlich die in Abschnitt 3.3.2 bestimmten Phasenschubkarten  $\Delta\phi_{R_n}^c(x, y)$ , sowie die bewegungskompensierten Intensitätsbilder  $\overline{I}_n^c(x, y)$  aus Abschnitt 3.3.1 benötigt.

Durch Anwendung eines  $3 \times 3$  Sobel-Filters auf den Phasenschubkarten  $\Delta\phi_{R_n}^c(x, y)$  wird neben der lokalen Gradientenstärke ebenso die Hauptgradientenrichtung bestimmt. Diese wird im Folgenden dazu verwendet, eine optimale, zur Richtung der  $(1 + \cos)$ -Projektion senkrecht stehende Auswerterichtung zu ermitteln. Für die Gradientenrichtung ist dabei eine Einteilung in  $45^\circ$ -Schritte, sowie einer  $180^\circ$ -Eindeutigkeit hinreichend. Entsprechend dieser Auswerterichtung wird ausgehend vom aktuell betrachteten Bildpunkt  $(x, y)$  in beiden Richtungen der Bildpunkt  $(x', y')$  gesucht, der maximale Entfernung zu  $(x, y)$  besitzt und für den gilt:

$$\text{abs}(\Delta\phi_{R_n}(x, y) - \Delta\phi_{R_n}(x', y')) < \text{Schwellwert} \quad (3.19)$$

Die empirische, hinreichend grobe Festlegung des Schwellwertes ist dabei hauptsächlich von der Breite projizierter  $(1 + \cos)$ -Perioden, aber auch dem verwendeten, konkreten 3D-Messsystem abhängig. Es ist anzumerken, dass die jeweils maximale Entfernung der für jeden Bildpunkt  $(x, y)$  bestimmten zwei Bildpositionen  $(x', y')$  nicht in beiden Richtungen identisch sein muss,  $(x, y)$  nicht zwangsläufig zentriert in seiner betrachteten Umgebung liegt. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der betrachtete Bildpunkt Teil einer Ebene ist, aber an deren Rand liegt.

An die Ermittlung der Umgebung eines jeden Bildpunktes  $(x, y)$  schließen sich die Lösung des Gleichungssystems (3.18) nach  $(a, u, v)^T$ , sowie die Bestimmung der Modulation  $b$  nach Gleichung (3.17) an.

```

Eingabe : Phasenschubkarten  $\Delta\phi_{R_n}^c(x, y)$ ,
           bewegungskompensierte Intensitätsbilder  $\overline{I_n^c(x, y)}$ 
Ergebnis : Matrizen der Beleuchtungsparameter  $a_n^c$  und  $b_n^c$ 

1  für  $c = 1$  : Kameraanzahl tue
2    für  $n = 1$  : Sequenzlänge tue
3      für  $(x, y) = (1, 1)$  : (Bildbreite, Bildhöhe) tue
4        bestimme Gradienten  $\nabla_n^c(x, y)$  auf Phasenschubkarten  $\Delta\phi_{R_n}^c(x, y)$  mithilfe
         $3 \times 3$  Sobel-Operator
5        für 4 Richtungen (2 entlang Bildachsen + 2 Diagonalen) tue
6          | suche  $\max \nabla [\Delta\phi_{R_n}^c(x, y)]$  ; // orthogonal zur Projektionsrichtung
7        Ende
8        für 2 Richtungen entsprechend Ergebnis Zeile 6, beginnend bei  $(x, y)$  tue
9          | suche  $\max_{(x', y')} d[(x, y) - (x', y')]$  mit  $\Delta\phi_{R_n}$ -Schwellwert
10       Ende
11       löse Gleichungssystem (3.18) mit maximaler Anzahl (Zeile 9) an
       Eingabewerten  $(\overline{I_n^c(x, y)}, \Delta\phi_{R_n}^c(x, y))$ 
12       bestimme  $b_n^c(x, y)$  unter Nutzung des zweiten und dritten Eintrags des
       Ergebnisvektors aus Zeile 11 nach Gleichung (3.17)
13     Ende
14   Ende
15 Ende

```

**Algorithmus 3.1** : Bestimmung der Beleuchtungsparameter  $a_n^c(x, y)$  und  $b_n^c(x, y)$  unter Nutzung eines schwellwertbasiert maximalen Bereiches an Bildpunkten der Umgebung des jeweils betrachteten Bildpunktes  $(x, y)$  – aus [Bre13].

Über die gesamte Sequenz von Beleuchtungsmatrizen  $a^c$  und  $b^c$  hinweg, lässt sich eine ausreichend vorhandene, relative Objektbewegung und damit die Existenz unterschiedlicher Lichtsituationen zur weiteren Verfeinerung verwenden. Ein entsprechendes Vorgehen ist durch Bian et al. [Bia14] und Dong et al. [Don14] mit der sogenannten „Fourier ptychography“ beschrieben. Dabei werden Beleuchtungsinformationen aus Bilddaten verschiedener Zeitpunkte im Frequenzraum zu einem hochaufgelösten Beleuchtungsfeld kombiniert. Die Grundlage hierzu entstammt einer Arbeit von Zheng et al. [Zhe13] aus dem Mikroskopiebereich.

### 3.3.3.3 Variable Reflektivität durch Objektbewegung

Stellt die zu vermessende Objektoberfläche keinen Lambertschen Strahler dar, existieren je nach Ausrichtung des Messobjektes zur Musterprojektion und den verwendeten Kameras verschiedene Artefakte durch direkte Lichtreflektionen. Intensitätsinformationen dieser Objektstellen sind in den Interferogrammen nicht auswertbar beziehungsweise verfälschen das Zwischenergebnis der Rohphasen  $\phi_{\text{rel}}$  signifikant. Daher empfiehlt sich eine Ausmaskierung betroffener Objektstellen, zumindest für den Aufnahmezeitpunkt des Auftretens derartiger Artefakte. Diese Ausmaskierung basiert auf den im vorangegangenen Abschnitt 3.3.3.2 bestimmten Modulationswerten  $b_n^c(x, y)$  und einer a priori nutzerdefinierten Schwellwertsetzung. Ausmaskierte Bildpunkte werden in den



Intensitätsbildern  $\overline{I_n^c}$  auf einen festen Wert „UNDEF“ außerhalb des typischen Wertebereiches für Grauwertbilder  $[0, 255] \in \mathbb{N}$  gesetzt und damit von weiteren Berechnungsschritten, wie der Rohphasenbestimmung, ausgeschlossen.

Die Tatsache variabler Reflektivität bei relativer Bewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor während  $T_{\text{Seq}}$  ermöglicht bei Betrachtung einer längeren Sequenz von Intensitätsbildern mit zum Beispiel  $n_{\text{max}} = 8$  auch eine Bestimmung von Rohphasenwerten  $\phi_{\text{rel}}$  an Bildpunkten, welche innerhalb der Sequenz teilweise als ausmaskiert gekennzeichnet sind. Hinreichend für die Ermittlung eines Rohphasenwertes  $\phi_{\text{rel}}(x, y)$  ist die Existenz von mindestens drei Intensitätswerten  $\overline{I_n^c}(x, y) \neq \text{UNDEF}$ .

### 3.3.3.4 Variabler Schattenwurf sekundärer Objekte

Ähnlich den in Abschnitt 3.3.3.1 besprochenen Einflüssen des Randabfalls der Musterprojektion auf die Auswertung der Intensitätsbilder  $I_n^c$ , existiert ein weiterer Faktor zur nicht Objekt bedingten Helligkeitsvariation: Schattenwurf sekundärer Objekte. Unter der Annahme aktiver Lichtquellen außerhalb des Projektionssystems, existiert in der betrachteten Messszene eine Umgebungsbeleuchtung, in der formalen Beschreibung von Interferogrammen durch den Parameter  $a_n^c$  repräsentiert. Für den Fall einer statischen Messsituation kann dieser Parameter analog zur Modulation  $b_n^c$  außer Acht gelassen werden, insbesondere bei der Durchführung einer pixelweisen Normierung der Intensitätsbilder  $I_n^c$  mithilfe des sogenannten und bereits erwähnten Hellbildes.

Die Handhabung dieses messtechnisch betrachteten Beleuchtungsartefakts kann unter Anwendung der in Abschnitt 3.3.3.2 vorgestellten und in Algorithmus 3.1 als Pseudocode beschriebenen Vorgehensweise für die Bestimmung von Rohphasen und folgender Schritte weitgehend eliminiert werden. Wie einem Trivialbeispiel mit kreisrunder Abschattung, zum Beispiel durch eine außerhalb des Kamerasichtfeldes befindlichen Kugel hervorgerufen, in Abbildung 3.13 zu entnehmen ist, sind die Einflüsse im Bereich der Abschattung entfernt. Ausschließlich an den Übergangsbereichen zwischen Abschattung und ungestörter Musterprojektion verbleiben Messartefakte. Dies begründet sich in der Herangehensweise der Bestimmung der Beleuchtungsparameter unter Mitbetrachtung

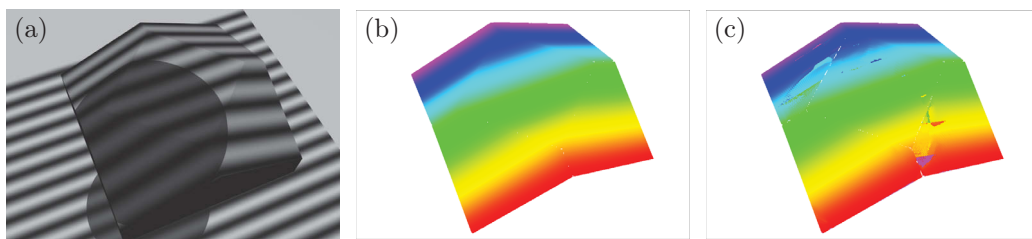


Abbildung 3.13: (a) Interferogramm mit begrenzter  $(1 + \cos)$ -Musterprojektion und stark ausgeprägtem Schattenwurf durch ein weiteres, in der Messszene sonst nicht sichtbares Objekt – aus [Bre13]. Die Verteilungen von Feinphasen  $\phi_{\text{abs}}$  auf dem prismatischen Messobjekt (b) ohne Einfluss von Schattenwurf, sowie (c) inklusive Kompensation der Schattenwurf bedingten Beleuchtungsänderung im Bild sind farbcodiert dargestellt. Aufgrund der Herangehensweise zur Bestimmung von Beleuchtungsparametern unter Betrachtung einer Bildpunktumgebung, existieren am Übergang von Schattenwurf zu „normaler“ Musterverteilung insbesondere im Bereich von Objektkanten Messartefakte.

von Bildpunkten der Umgebung. Im signifikant fehlerbehafteten Bereich rechts der nach vorn zeigenden Prismenecke addieren sich die Einflüsse aus Objektabschattung und Kantenverlauf des Messobjektes. Die daraus resultierende Umgebungsgröße und damit Anzahl an Wertepaaren  $\left(\overline{I_n^c(x, y)}, \Delta\phi_{R_n}^c(x, y)\right)$  als Eingabe in das Gleichungssystem (3.18) ist sehr gering und führt zu dieser hohen Fehleranfälligkeit in den Rohphasen  $\phi_{\text{rel}}(x, y)$ .

### 3.3.4 Einfluss von Intensitätsrauschen (SNR)

Weiteren Einfluss auf die Güte von Rohphasen und allgemein den Messdaten besitzt das Signal-Rausch-Verhältnis der verwendeten Kameras. Entgegen der Beschreibung von additivem Rauschen bei Simulationen zum Beispiel mithilfe der Gaußschen Normalverteilung, besitzen Realdaten zumeist eine eher zufällige Verteilung der Lage und Intensität an Grauwertabweichungen  $\delta I(x, y)$  in den Intensitätsbildern  $I(x, y)$ . Dabei ist die Größenordnung von  $\delta I$  neben der Fläche eines Pixels auf dem Kamerasensor  $A_{px}$  auch von der Länge der Belichtung einer Einzelaufnahme  $T(t)$  und der Summe aus gegebener Umgebungsbeleuchtung und der Beleuchtungsstärke des Projektionssystems  $E_V$  abhängig. Erstrecken sich die Effekte von Grauwertabweichungen ausschließlich auf Einzelpixel, ist dessen Kompensation sowohl durch die Anwendung von Filterkernen größer einem Einzelpixel, sowie der Wertemittlung über eine Messsequenz hinweg möglich. Abhängigkeiten zwischen der Fehlergröße und der Länge einer Messsequenz werden in Abschnitt 3.4.2 diskutiert, sowie in Abschnitt 4.6.3 quantitativ beschrieben.

Zusätzliche Abweichungen der Intensitätswerte basieren auf der nichtlinearen Sensorkennlinie, deren Abweichungen vom Idealzustand der Linearität durch Testmessungen approximativ bestimmbar sind, sich aber nicht vollständig kompensieren lassen. Allgemein beschreibt die Sensorkennlinie die Zuordnung projizierter Soll-Grauwerte zu quantisierten Kameraintensitäten. Diese Zuordnung wiederum ist nicht statisch, sondern unterliegt vielmehr Einflüssen wie Umgebungs- und Hardwaretemperaturen. Trotz der Korrektur der Sensorkennlinie verbleiben insbesondere in Bereichen geringer, sowie hoher Intensitätswerte Abweichungen, die bei der Aufnahme einer idealen  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung zu verstärkten Abflachungen an den Funktionsextrema führen.

## 3.4 Grenzen der Objektbewegung

### 3.4.1 Schärfe von Einzelaufnahmen

Die Schärfe einzelner Interferogramme ist von einer Mehrzahl an Parametern abhängig. Der Begriff der Bildschärfe soll im Folgenden quantitativ betrachtet werden, das heißt sich über die Größe der Bildinformation, der Unterscheidbarkeit von Details wie Helligkeit, Farbton und Farbtintensität definieren. Der subjektive Schärfeeindruck, die qualitative Bewertung eines Bildes, ist dabei eher zweitrangig. Grundsätzlich lassen sich im Anwendungsbereich der Bildaufnahme unter Bewegungseinflüssen zwei Kategorien an Unschärfe, also dem Fehlen eines Mindestmaßes an Schärfe differenzieren:

- Unschärfe durch Tiefenausdehnungen des Messobjektes außerhalb des Schärfentiefebereichs der Projektion, sowie Fehlfokussierung und/oder unzureichende Schärfentiefe der Kameras
- Unschärfe durch relative Bewegung zwischen 3D-Sensor und Messobjekt während der Belichtungszeit  $T(t)$ , die sogenannte Bewegungsunschärfe

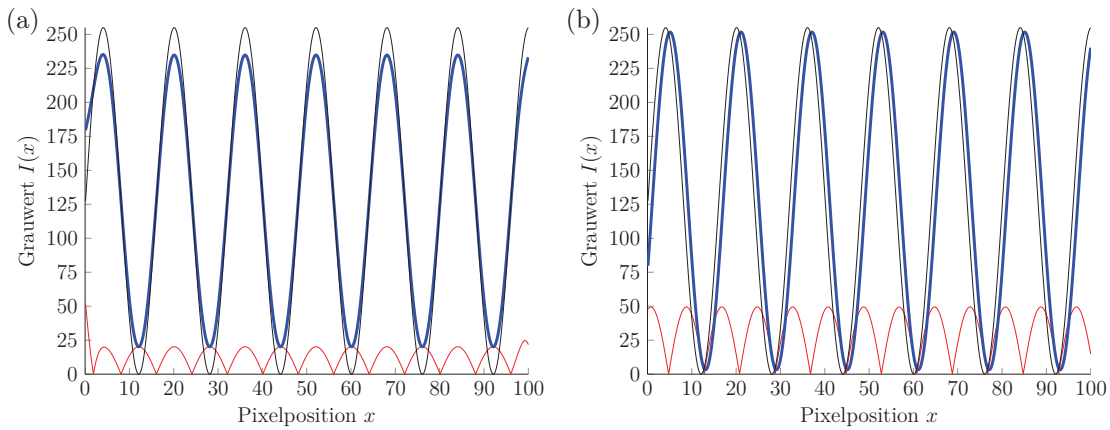


Abbildung 3.14: Farblich codiert sind schwarz die Original- $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung, in blau das Ergebnis unter Berücksichtigung der Unschärfe, sowie rot die Grauwertabweichung zwischen Original- und gestörtem Muster. (a) Unschärfe in der Abbildung von  $(1 + \cos)$ -Musterstrukturen. (b) Bewegungsunschärfe durch Grauwertintegration über Belichtungszeit  $T(t)$ .

Für beide Kategorien sind anhand jeweils eines beispielhaften Systemsetups Auswirkungen gegenüber einem idealen Funktionsverlauf einer  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung in Abbildung 3.14 dargestellt. Dabei wird von einer maximalen Modulation im Grauwertbereich  $[0, 255]$ , sowie der Abbildung von 64 vollständigen  $(1 + \cos)$ -Perioden über eine Bildbreite von 1.024 Pixeln ausgegangen.

Für die Simulation des erstgenannten Falls, der Projektion beziehungsweise Bildaufnahme außerhalb des jeweiligen Schärfentiefebereichs, fand ein eindimensionaler, gaußscher Glättungsfilter mit einer Kernelbreite von 11 Pixeln Anwendung. Als weitere Parameter wurden eine Varianz  $\sigma = 1,5$ , sowie die Mittelwertfreiheit  $\mu = 0$  verwendet. Wie dem blauen Funktionsverlauf in Abbildung 3.14 (a) im Vergleich zur Original- $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung in schwarz entnommen werden kann, findet keine Änderung der Phasenlage statt. Abhängig von der Kernelbreite, sowie der Varianz des Gaußfilters verringert sich die Modulation des Intensitätsverlaufs. Beispielhaft können die Einflüsse der Parameter Kernelbreite und Varianz in Bezug auf eine Bildbreite von 1.024 Pixeln der folgenden Tabelle 3.1 entnommen werden:

Tabelle 3.1: Parametereinfluss einer Unschärfesimulation durch Glättung mithilfe eines Gaußfilters auf eine  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung. Die durch Fettdruck hervorgehobene Zeile entspricht der Parameterbelegung von Abbildung 3.14 (a).

Kernelbreite	Varianz $\sigma$	Mittelwert $\mu$	Modulation
3 px	0,25	0	99,52 %
5 px	0,75	0	95,97 %
<b>11 px</b>	<b>1,5</b>	<b>0</b>	<b>84,18 %</b>
31 px	4,5	0	20,93 %

Abbildung 3.14 (b) spiegelt wiederum mit dem blauen Funktionsverlauf die Änderungen der Intensitätsverteilung bei relativer Bewegung zwischen 3D-Sensor und Messobjekt während der Aufnahmezeit  $T(t)$  wider. Zu erkennen ist neben der Verringerung der Grauwertmodulation auch

ein Phasenschub, der in Bezug zur Originalfunktion eine signifikante Grauwertänderung an jeder Pixelposition hervorruft (rote Kurve). So induziert ein 3D-Messsystem mit deckungsgleicher Projektion und Beobachtung, sowie des Weiteren den in Tabelle 3.2 genannten Sensor- und Systemparametern bereits bei einer Relativbewegung von  $v_{\text{rel}} = 200 \text{ cm/s}$  eine Bewegungsunschärfe von 2 Pixeln in jeder Kamera, eine maximale Differenz von 49,45 Grauwerten, sowie eine Modulationsverringerng um 2,55 Prozent.

Tabelle 3.2: Sensor- und Systemparameter zur Bestimmung der Bewegungsunschärfe

**Musterprojektion (LG HS102G):**

Bildpunktanzahl (nativ)	$600 \times 800 \text{ Pixel}$
Projektionsfläche (bei Minimalabstand von 38 cm)	$240 \times 320 \text{ mm}^2$
Pixelgröße in Projektionsebene	$2,23 \times 0,4 \text{ mm}^2$

**Kameras (IDS UI-3240CP-M-GL – µEye USB 3.0):**

Bildpunktanzahl	$1.024 \times 1.280 \text{ Pixel}$
Pixelgröße (quadratisch)	$5,30 \text{ µm}$
Bildwiederholrate	$60 \text{ Hz}$
maximale Belichtungszeit pro Aufnahme	$15 \text{ ms}$

**Systemsetup:**

Messfeldgröße (identisch mit Projektionsfläche)	$240 \times 320 \text{ mm}^2$
Abstand 3D-Sensor $\leftrightarrow$ Messebene	$38 \text{ cm (Minimum)}$

Lineare Relativbewegungen von  $v_{\text{rel}} = 1.667 \text{ cm/s}$  ( $\hat{=}$   $60 \text{ km/h}$ ) führen bei den gleichen Systemspezifikationen wie in den vorangegangenen Darstellungen zu einer Bewegungsunschärfe von  $16,6$  Pixeln, einer maximalen Grauwertdifferenz von  $122,22$  und einer Modulationsverringerng um  $95,82$  Prozent.

Positiv ist im Gesamten festzuhalten, dass unabhängig der Art und Form vorherrschender Unschärfe die projizierten Intensitätsverteilungen in  $(1+\cos)$ -Form erhalten bleiben. Auswirkungen betreffen ausschließlich die Modulation vorhandener Grauwerte, sowie die Phasenlage. Für hohe Relativgeschwindigkeiten, wie die im letzten Beispiel erwähnten  $60 \text{ km/h}$ , sind aufgrund der Bewegungsunschärfe keine Bestimmungen von Rohphasen mehr möglich, so dass das Verfahren der Bewegungskompensation grundsätzlich Einschränkungen unterliegt, welche im Kapitel 4 quantitativ detaillierter betrachtet werden.

### 3.4.2 Mindestanzahl verschiedener Muster pro Sichtbereich

Einen weiteren Einflussfaktor auf die Genauigkeit der Phasen- und dreidimensionalen Koordinatenbestimmung stellt die Anzahl im Messraum disjunkter Projektionsmuster einer Messsequenz dar. Dieser Zusammenhang wurde unter anderem von Lutzke et al. [Lut13] im Vergleich der Verwendung zweidimensional statistischer Muster einerseits, sowie andererseits  $(1+\cos)$ -Intensitätsverteilungen für die makroskopische 3D-Messtechnik quantifiziert. Als Grundaussage ableitend ist zur Verringerung des 3D-Messfehlers, der gemittelten euklidischen Distanz aller Punkte einer 3D-Punktwolke in Bezug zum Ground-Truth-Oberflächen- oder auch CAD-Modell, die Erhöhung der Anzahl verwendeter Projektionsmuster pro Messsequenz bis zu einem Optimum empfehlenswert. Dieses Optimum ist durch weitere Parameter, wie die Anzahl und Breite verwendeter  $(1+\cos)$ -Muster

beeinflusst [Lut13]. Nach unten wird die Anzahl zur dreidimensionalen Koordinatenbestimmung notwendiger Muster entsprechend Gleichung (1.2) durch  $n = 3$  begrenzt.

Im Allgemeinen liefert die Hinzunahme im Messraum disjunkter Intensitätsverteilungen zusätzliche Informationen und damit eine Überbestimmung des auf Gleichung (1.2) basierenden Gleichungssystems. Diese Überbestimmtheit lässt sich zum Ausschluss fehlerbehafteter Einzeldaten, sogenannten Ausreißern, innerhalb einer Messsequenz nutzen. Unter der Annahme über den Zeitraum  $T_{\text{Seq}}$  in sich strukturfester Messobjekte lassen sich auf diese Weise unter anderem Daten oder Objektbereiche eines Zeitpunktes  $t$ , welche signifikant von Daten der weiteren Zeitpunkte innerhalb der Messsequenz  $T_{\text{Seq}}$  abweichen, von weiteren Berechnungen ausschließen. Gelingt dies nicht, ist zumindest eine Fehlerreduktion durch Mittlung durchführbar. Quantitative Ergebnisse zur Reduktion von Abweichungen zwischen durch Einzelbildanalyse gewonnenen Grob-3D-Daten und dem Ground-Truth-Modell über eine Messsequenz mit  $n \gg 3$  werden in Abschnitt 4.6.1 gegeben und diskutiert.

Während bisherige Betrachtungen und Diskussionspunkte auf Messsequenzen mit weitgehend konstantem Beobachtungsfeld und ähnlicher Beobachtungsrichtung der Messszene fokussiert waren, lässt sich das in den bisherigen Abschnitten dieses Kapitels 3 beschriebene Vorgehen zur Bewegungsdetektion und -kompensation auch auf signifikant voneinander verschiedene Beobachtungsfelder und -richtungen innerhalb einer Messsequenz über den Zeitraum  $T_{\text{Seq}}$  anwenden. Prominentestes Beispiel für dieses Vorgehen ist die Rundumvermessung strukturfester, das heißt während  $T_{\text{Seq}}$  nicht deformierbarer Körper. Dabei erfolgt aus Gründen der zwingenden Überlagerung einzelner Grob-3D-Ergebnisse zur Bestimmung sechs-dimensionaler Bewegungsvektoren die Bewegungskompensation innerhalb einer Messsequenz zu verschiedenen Referenzansichten. Die so entstehenden Teilsequenzen  $T_{\text{Seq}}^p \in T_{\text{Seq}}$  benötigen eine Mindestanzahl von  $n = 3$  bewegungskompensierten Intensitätsbildern  $\overline{I_n}$ . Auch hier gilt bis zum Erreichen eines Optimums: Je länger eine Teilsequenz  $T_{\text{Seq}}^p$ , desto effizienter lassen sich fehlerbehaftete Daten oder Bereiche aus weiteren Berechnungen ausschließen oder kompensieren.

Kritisch muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass die Fehleranfälligkeit der Bewegungsdetektion, sowie die Bestimmung sechs-dimensionaler Bewegungsvektoren mit der Länge der Messsequenz beziehungsweise einer jeden Teilsequenz  $T_{\text{Seq}}^p$  zunimmt. Insbesondere für signifikante Unterschiede der Beobachtungsfelder und -richtungen zwischen den Einzelbildaufnahmen und daraus resultierenden Grob-3D-Ergebnissen ist die Zuordnung einander zugehöriger, dreidimensionaler Objektpunkte  $O_k$  unter Verwendung der vorgestellten Algorithmen schwierig. Quantitative Aussagen zu diesem Punkt lassen sich Abschnitt 4.6.2 entnehmen. Es gilt also ein ausgewogenes Maß an Größe der Verschiebung zwischen zwei Zeitpunkten  $t$  und der Länge einer Teilsequenz  $|T_{\text{Seq}}^p|$  in Abhängigkeit von Projektions- und Bildaufnahme rate, sowie der relativen Bewegungsgeschwindigkeit  $v_{\text{rel}}$  zu finden.

## 3.5 Oberflächenkonstanz: Strukturfest vs. deformierbar

Dreidimensionale Objektvermessungen dynamischer Szenen mit aktiver Musterprojektion lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilen:

1. **relative Objektbewegung:** Zwischen dem makroskopischen Messobjekt und dem 3D-Sensor, bestehend aus mindestens einer Kamera und einem Projektionssystem, existiert während der Zeitspanne  $T_{\text{Seq}}$  von Musterprojektion und Bildaufnahme eine relative Bewe-

gung, das heißt entweder das Messobjekt bewegt sich oder der 3D-Sensor ist global nicht ortsfest oder beides ist zutreffend. Für das Messobjekt an sich gilt aber Oberflächenkonstanz, zumindest während  $T_{\text{Seq}}$ , das bedeutet das sowohl die Objektform als auch die objekteneigene Textur unveränderlich sind.

2. **Oberflächendeformation:** Das zu vermessende Objekt ist grundsätzlich nicht strukturfest beziehungsweise unterliegt während des Messvorgangs einer, möglicherweise von außen zugeführten Oberflächendeformation. Zusätzliche, relative Bewegung kann, muss aber nicht gegeben sein. Prominentes Beispiel dieser Kategorie ist die dreidimensionale Vermessung von Lebewesen.

Die Anwendung der in diesem Kapitel vorgestellten Ansätze und Algorithmen ist nicht auf strukturfeste Objekte mit relativer Bewegung zum 3D-Sensor beschränkt. Die Erstellung bewegungskompensierter Intensitätsbilder  $\overline{I}_n$ , sowie die Bestimmung des lokal variierenden Phasenschubs  $\Delta\phi_{R_n}$  ist ebenso für Objekte mit Oberflächendeformationen während  $T_{\text{Seq}}$  möglich. Grundvoraussetzung hierfür ist die Verfolgung jedes einzelnen Objektpunktes  $O_k$  über  $T_{\text{Seq}}$  hinweg, soweit  $O_k$  grundsätzlich beziehungsweise solange  $O_k$  sichtbar ist. Die Bestimmung sechs-dimensionaler Bewegungsvektoren durch Ansätze, wie sie in Abschnitt 3.2.2 vorgestellt wurden, ist damit ausgeschlossen, da diese Ansätze und Algorithmen die Oberflächenkonstanz des Messkörpers, zumindest innerhalb der Zeitspanne  $T_{\text{Seq}}$  voraussetzen.

Zur sogenannten Registrierung, der bestmöglichen (räumlichen) Überlagerung von zwei dreidimensionalen Punktwolken, zwischen denen keine global starre Transformation möglich ist, werden in der Literatur zwei wesentliche Herangehensweisen beschrieben. Zum einen ist es gerade für während  $T_{\text{Seq}}$  auseinander brechende Messobjekte möglich, eine partielle Strukturfestigkeit anzunehmen. Damit lässt sich jeweils für einen Teil des Messobjektes eine starre Transformation zwischen zwei Messergebnissen bestimmen. Die Vereinigung dieser Vielzahl starrer Transformationen ergibt die Gesamtregistrierung, welche gegenüber dem in dieser Arbeit im Fokus stehenden Ansatz ausschließlich lokal begrenzt einheitlich ist. Detailliertere Informationen zu diesem Vorgehen wurden unter anderem von Bonarrigo et al. in [Bon14] beschrieben.

Ein zweiter Ansatz ist die Modellierung des in seiner Art bekannten oder zuvor in groben Zügen statisch vermessenen Messobjektes durch Stützpunkte. Bei dreidimensionalen Körpervermessungen von Tieren und Menschen bieten sich hierbei Gelenke als Stützpunkte in Verbindung mit möglichen Bewegungsradien zur grundsätzlichen Modellierung an. Damit lassen sich Suchräume für die Transformationen zwischen Punkten beziehungsweise Objektteilen zwischen zwei 3D-Punktwolken einschränken und basierend darauf im Sinn sogenannter „kleinster Quadrate“-Ansätze optimale Registrierungen bestimmen. Beispielhafte Umsetzungen dessen sind von Chang und Zwicker in [Cha09], Liu in [Liu07] und Lee et al. in [Lee04] fachbereichsübergreifend veranschaulicht.

In dieser Arbeit soll der Fokus auf strukturfesten, makroskopischen Messobjekten mit Oberflächenkonstanz liegen, weshalb zur Gewinnung sechs-dimensionaler Bewegungsvektoren „kleinste Quadrate“-Methoden über die gesamte Objekttopographie, wie in Abschnitt 3.2.2 Anwendung finden.



## Kapitel 4

# Simulationen zur 3D-Bewegungskompensation

### 4.1 Praktische Unterschiede zwischen 3D-Rückprojektion und Raytracing

Die Bestimmungsbasis dreidimensionaler Objektkoordinaten  $O_k$  mithilfe einer Sequenz zweidimensionaler Bilddaten  $I_n$  ist die Bereitstellung von 2D-Punktkorrespondenzen  $(x, y)_n^{c1} \mapsto (x, y)_n^{c2}$  zwischen den verschiedenen Kameraansichten  $c1$  und  $c2$ , aber auch den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten  $n$ . Während in statischen Messsituationen die Punktkorrespondenzen für alle Aufnahmezeitpunkte  $n$  fixiert sind, ergeben sich wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, bei Betrachtung eines konkreten 3D-Objektpunktes  $O_k$  für dynamische Messvorgänge in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit  $v_{\text{rel}}$  teilweise signifikante Änderungen der 2D-Koordinaten  $(x, y)$  über  $n$  hinweg. Unter Kenntnis der jeweiligen Lage eines konkreten Objektpunktes  $O_k$  in einem bezüglich des Aufnahmezeitpunktes  $n = 1$  fixierten Koordinatensystems  $\text{KOS}^{n=1} \in \mathbb{R}^3$ , sowie den Kalibrierparametern zumindest beider Kameras, lassen sich die zweidimensionalen Abbildungen von  $O_k$  auf die beiden Sensorebenen  $c1$  und  $c2$  zu allen Aufnahmezeitpunkten  $n$  bestimmen. Die Transformation zwischen dem dreidimensionalen Koordinatensystem  $\text{KOS}^{n=1}$  und den Sensorkoordinatensystemen  $\text{KOS}^{c1}$  und  $\text{KOS}^{c2}$  lässt sich durch zwei verschiedene Herangehensweisen realisieren, deren Vorgehen, Gemeinsamkeiten und sich durch Unterschiede ergebende Vor- und Nachteile im Folgenden beschrieben wird. Grundsätzlich erfolgt die Differenzierung in

- 3D-Rückprojektion:  $O_k^n \in \mathbb{R}^3 \mapsto (x, y)_n^c \in \mathbb{R}^2$ ,
- Raytracing:  $(x, y)_n^c \in \mathbb{N}^2 \mapsto \begin{cases} O_k^n \in \mathbb{R}^3 \\ \emptyset \\ O_l^n \in \mathbb{R}^3 \neq O_k^n \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \overline{I(x, y)_n^c} = \text{UNDEF} \\ \overline{I(x, y)_n^c} = \text{UNDEF} \end{cases}$ .

Beide Verfahren ermöglichen durch Nutzung a priori bekannter intrinsischer und extrinsischer Kalibrierungsdaten die Zuordnung von dreidimensionalen Objektpunkten  $O_k$  und zweidimensionalen Bildkoordinaten  $(x, y)_n^c$ . Hauptunterschied ist die Berechnungsrichtung, wobei der sogenannte Vorwärtsschnitt vom Rückwärtsschnitt unterschieden wird. Dabei lassen sich Raytracing-Verfahren dem Vorwärtsschnitt zuordnen: Ausgehend von 2D-Punktkoordinaten wird der Schnittpunkt von zwei Strahlen, welche von den optischen Zentren der verwendeten Kameras ausgehen und in Abbildung 4.1 durch  $r_{(x_i, y_j)^{c1}}$  und  $r_{(x_i, y_j)^{c2}}$  bezeichnet sind, im Raum bestimmt. Dieser Schnittpunkt spiegelt bei triangulationsbasierten 3D-Messverfahren den von beiden 2D-Punktkoordinaten  $(x_i, y_j)^{c1}$  und  $(x_i, y_j)^{c2}$  abgebildeten 3D-Objektpunkt  $O_k$  wider, soweit  $(x_i, y_j)^{c1}$  und  $(x_i, y_j)^{c2}$  zueinander korrespondierend sind. Liegt für den Objektpunkt  $O_k$  zum Aufnahmezeitpunkt  $n$  im Zusammenhang mit den Kamerablickrichtungen auf das Messobjekt eine Verdeckung vor, existieren

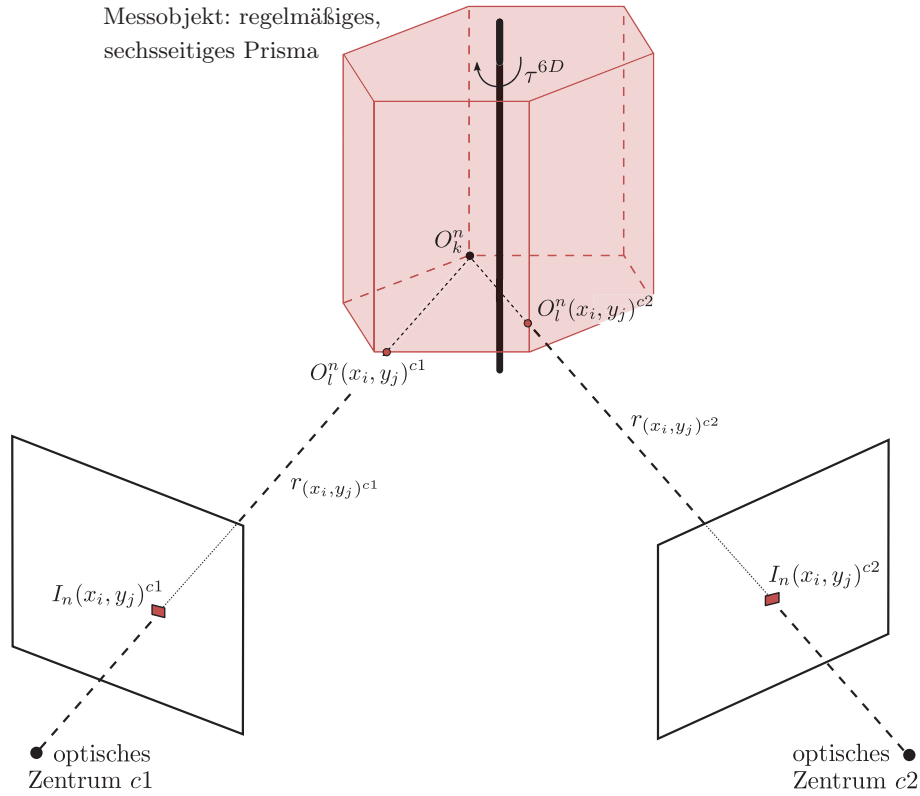


Abbildung 4.1: Unterschiedliche Zuordnung von 3D-Objektpunkten und 2D-Bildkoordinaten bei Anwendung von 3D-Rückprojektion und Raytracing-Verfahren.

in den Bildebenen  $I_n^{c1}$  und  $I_n^{c2}$  keine Abbildungen von  $O_k$ . Vielmehr wird jeweils derjenige Objektpunkt  $O_l^n \neq O_k$  in die Sensorebenen der Kameras abgebildet, der für die jeweilige Verdeckung von  $O_k$  verantwortlich ist –  $O_l^n$  liegt aus Kamerablickrichtung vor  $O_k$ . In Abbildung 4.1 entspricht  $I_n(x_i, y_j)^{c1}$  der in die Bildebene  $c1$  projizierten Wiedergabe von  $O_l^n(x_i, y_j)^{c1}$ ;  $I_n(x_i, y_j)^{c2}$  ist dem 3D-Objektpunkt  $O_l^n(x_i, y_j)^{c2}$  des regelmäßig, sechseckigen Prismas zugeordnet.

Der Vorwärtsschnitt, das sogenannten Raytracing-Verfahren bestimmt die korrekte Zuordnung zwischen einem 2D-Bildpunkt  $(x, y)_n^c \in \mathbb{N}^2$  und dem 3D-Objektpunkt  $O_l^n \in \mathbb{R}^3$ , welcher zum Aufnahmezeitpunkt  $n$  aus Blickrichtung der Kamera  $c$  sichtbar und damit in die Kamerabildebene abgebildet ist. Grundvoraussetzung für die Bestimmung von Sichtbarkeiten und Verdeckungen ist die Repräsentation des Messobjektes  $\mathbb{O}$  in Form eines Voxelmodells [Mun11, Abschnitt 3.1.1]. Ein Voxel im dreidimensionalen Raum als Äquivalent zum Pixel innerhalb einer zweidimensionalen Bildebene beschreibt die Füllung des würfelförmigen Teilraumes mit konkreten Eckkoordinaten innerhalb des zum Aufnahmezeitpunkt  $n = 1$  definierten Weltkoordinatensystems  $\text{KOS}^{n=1}$ . Werden von einem Sichtstrahl  $r$  ausgehend vom optischen Zentrum einer Kamera mehrere Voxel geschnitten, gilt der Raumwürfel mit gerinster Distanz zur Lage des optischen Kamerazentrums als sichtbar. Alle weiteren geschnittenen Voxel werden als verdeckt kategorisiert. Existiert für einen festen Sichtstrahl  $r(x_i, y_j)^c$  kein Schnittpunkt mit einem durch das Messobjekt  $\mathbb{O}$  gefüllten Voxel, ist die Menge der sichtbaren Objektpunkte leer (zuvor durch  $\emptyset$  bezeichnet). Dies hat bei der Berechnung bewegungskompensierter Intensitätsbilder zur Folge, dass der Wert des zugehörigen Bildpunktes  $\overline{I(x, y)_n^c}$  auf undefiniert „UNDEF“ gesetzt und von weiter Berechnungsschritten ausgeschlossen wird.



Das als 3D-Rückprojektion bezeichnete Verfahren lässt sich dem gegenüber dem sogenannten Rückwärtsschnitt zuordnen, da ausgehend von einem konkreten, bis zum aktuellen Aufnahmezeitpunkt  $n$  mindestens einmal sichtbaren Objektpunktes  $O_k$  der Schnittpunkt mit der Kamerasensorebene bestimmt wird. Dieser Schnittpunkt muss dabei keinem ganzzahligen Koordinatenpaar entsprechen; er ist vielmehr Element des  $\mathbb{R}^2$ , ausschließlich durch die Grenzen des konkreten Sensors beschränkt. Für die Grauwertbestimmung bewegungskompensierter Intensitätsbilder  $\bar{I}_n^c$  werden für einen konkreten Bildpixel  $(x, y)_n^c$  gewichtet alle Zuordnungen  $O_k^n \mapsto (x, y)_n^c$  berücksichtigt, die der flächigen Ausdehnung dieses Sensorelementes entsprechen.

Entscheidender Vorteil der 3D-Rückprojektion gegenüber Raytracing-Verfahren ist die Berechnungskomplexität, sowie der Speicherbedarf. Für die Repräsentation der zum Aufnahmezeitpunkt  $n$  sichtbaren Punkte des Messobjektes  $\mathbb{O}$  sind ausschließlich  $3 \cdot |\{O_k^n\}|$  Werte  $\in \mathbb{R}$  notwendig. Die Berechnung der 3D-Rückprojektion erfolgt für jeden Objektpunkt  $O_k$  durch Multiplikation mit der Projektionsmatrix  $P^{3 \times 4}$ , welche die intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter enthält, wie folgend kurz formalisiert:

1. Überführung des  $3 \times 1$ -Vektors  $O_k$  in homogene Schreibweise durch Erweiterung um einen vierten Eintrag mit dem Skalierungswert 1
2. Bestimmung der homogenen Abbildung von  $O_k$  auf der jeweiligen Sensorebene:  

$$P^{3 \times 4} \cdot \widehat{O_k^{4 \times 1}} = \widehat{(x, y)^{c, 3 \times 1}}$$
3. komponentenweise Division der homogenen Abbildung von  $O_k$  mit der dritten Komponente:  

$$(x, y)^{c, 2 \times 1} = \left( \widehat{(x, y)^{c, 3 \times 1}}(1) / \widehat{(x, y)^{c, 3 \times 1}}(3), \widehat{(x, y)^{c, 3 \times 1}}(2) / \widehat{(x, y)^{c, 3 \times 1}}(3) \right)$$

Die Berechnungskomplexität liegt danach bei  $\mathcal{O} |\{O_k\}|$ , wobei  $|\{O_k\}|$  die Anzahl bis zum aktuellen Aufnahmezeitpunkt  $n$  mindestens einmal gesehener Objektpunkte umfasst. Die räumliche Lage aktuell verdeckter, zu vorherigen Aufnahmezeitpunkten aber mindestens einmal sichtbarer Objektpunkte ist durch die Annahme einer starren Objekttransformation  $T^{6D}$  zwischen den einzelnen Aufnahmezeitpunkten gegeben. Die konkrete Sichtbarkeit von  $O_k$  zum Zeitpunkt  $n$  ist nicht bekannt, weshalb bei Verdeckungssituationen eine Fehlzuzuordnung von  $O_k \mapsto (x, y)_n^c$  möglich ist, wenn  $(x, y)_n^c$  wie in Abbildung 4.1 veranschaulicht eigentlich die optische Abbildung eines 3D-Punktes  $O_l^n \neq O_k$  ist. Ausschließlich unter den Annahmen der Verwendung von Messobjekten mit konvexer Oberfläche und keinen Selbstverdeckungen während  $T_{\text{Seq}}$  ist das Vorgehen der 3D-Rückprojektion fehlerfrei.

## 4.2 Konfiguration zur Bildsimulation

In diesem Kapitel werden ausschließlich Messergebnisse auf Basis synthetisch erzeugter Bilddaten  $I_n$  beschrieben, ausgewertet und diskutiert. Die Erzeugung dieser Daten erfolgt mithilfe des frei verfügbaren Programms „POV-Ray“ in der Version 3.7 [Vis13]. Tabelle 4.1 zeigt die verwendeten System- und Komponentenparameter, die global für alle Versuchsdurchführungen dieses Kapitels gelten, soweit nicht explizit anderweitige Werte vermerkt sind.

Der 3D-Sensor besteht aus einem Projektionssystem zur Abbildung von  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen im 8-Bit-Grauwertbereich in den Messraum, dessen Zentrum im vorab definierten Weltkoordinatensystem  $\text{KOS}^{\text{Welt}}$  oberhalb des Koordinatenursprungs bei  $(0; 0; 400)$  liegt. Zur Bildaufnahme werden zwei baugleiche Flächenkameras verwendet, die in einem Triangulationswinkel von  $30^\circ$  jeweils gleichen Abstand zum in der Mitte liegenden Projektionssystem haben. Das Sichtfeld jeder Kamera besitzt eine Größenordnung von gerundet  $250 \times 250 \text{ mm}^2$ .

Tabelle 4.1: System- und Komponentenparameter für die Versuchsdurchführung basierend auf synthetischen Daten.

<b>Projektionssystem:</b>		<b>Flächenkameras:</b>	
Bildpunktanzahl	$1.024 \times 1.024$ Pixel	Bildpunktanzahl	$1.024 \times 1.024$ Pixel
Bildpunktgröße	$10,91 \mu\text{m}$	Bildpunktgröße	$5,50 \mu\text{m}$
Brennweite	$17,8750 \text{ mm}$	Brennweite	$6,7584 \text{ mm}$
Lage in KOS <sup>Welt</sup>	$(0; 0; 400) \text{ mm}$	Lage in KOS <sup>Welt</sup>	$(103,53; 0; 386,37) \text{ mm}$ $(-103,53; 0; 386,37) \text{ mm}$
<b>Systemsetup:</b>			
Sichtfeld	$250 \times 250 \text{ mm}^2$	Triangulationswinkel	30 Grad

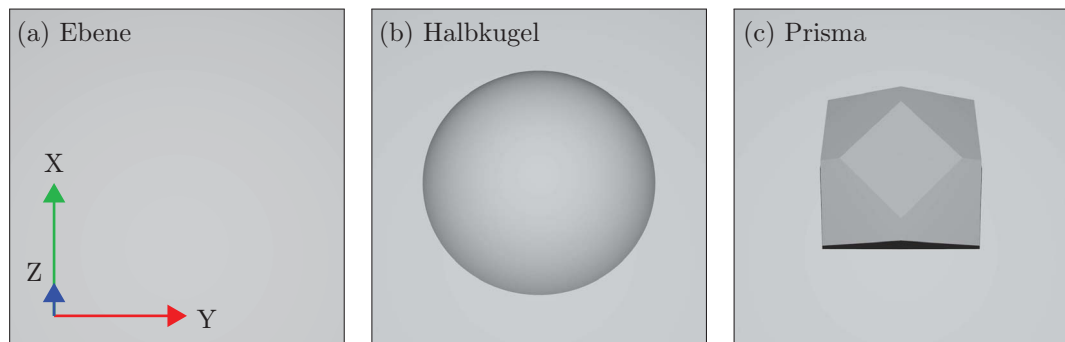


Abbildung 4.2: Beispielfache Veranschaulichung verwendeter Messobjekte zur Erzeugung synthetischer Bilddaten  $I_n$  – (a) Ebene (mit Weltkoordinatensystem KOS<sup>Welt</sup>), (b) Halbkugel, (c) prismatischer Körper (im Folgenden kurz als „Prisma“ bezeichnet). Die jeweilige Ansicht entspricht der Blickrichtung der als Master definierten Kamera c1. Für eine gute Erkennbarkeit der einzelnen Objekte wurde auf eine Musterprojektion verzichtet; die Intensitätsbilder entsprechen damit einem in Abschnitt 1.1 definierten Hellbild. Zur realitätsnahen Simulation wurde neben der Aktivierung von Schattenwurf auch eine Randabdunklung insbesondere zu den Bildecken von maximal 7 Prozent verwendet, was 14 Grauwerten entspricht.

Als Messobjekte werden texturfreie, geometrische Primitiva in Form einer Ebene, einer Halbkugel mit einem Radius von 100 mm sowie eines prismatischen Körpers der Grundflächen-Kantenlänge von 108 mm verwendet, wie sie in Abbildung 4.2 veranschaulicht sind. Die Verifikation erzielter Messergebnisse erfolgt unter anderem an vergleichbaren Realobjekten in Kapitel 5.

In den Abschnitten 4.3.2, 4.6.3 und 4.6.4 wird ein Vergleich zur „Fourier-Transformations-Profilometrie“ von Takeda und Mutoh [Tak83] gegeben, dessen grundlegende Theorie bereits im Abschnitt 3.2.1.2 beschrieben und der Systemaufbau in Abbildung 3.2 (a) schematisch visualisiert wurde. Neben zu Tabelle 4.1 identischen Werten für die Bildpunktanzahl, Bildpunktgröße und Brennweite der verwendeten Flächenkamera sowie des Projektionssystems, sind folgende, in Abbildung 3.2 (a) veranschaulichte Systemparameter dazu wesentlich:

- $l_0$  – Abstand zur Referenzebene  $R$ : 400 mm
- $p_0$  – Abbildungsgröße einer  $(1 + \cos)$ -Periode auf der Referenzebene  $R$ : 3,906 mm
- $d$  – Abstand zwischen Projektionssystem und Kamera: 60 mm

### 4.3 3D-Objektrekonstruktion durch Einzelbildanalyse

Die Ergebnisdarstellung erfolgt durch die Angabe von Standardabweichungen über *3D-Fehler* berechneter, dreidimensionaler Punktwolken  $\{O_k\}$  im Vergleich zu sogenannten „Ground-Truth“-Datensätzen. Die Ermittlung dieser Standardabweichungen erfolgt mithilfe des 3D-Inspektionsprogramms „Geomagic Qualify 12“ [Geo14]. Als „Ground-Truth“ werden dabei Solldaten bezeichnet, die im Fall von Simulationen Basis der synthetischen Bilderzeugung, sowie bei Realdatensätzen entweder durch CAD-Daten oder 3D-Resultate eines hochpräzisen Messvorganges unter Verwendung einer vollständigen Sequenz (Definition in Abschnitt 1.1) sind. Als 3D-Fehler  $\epsilon^{3D}$  wird die euklidische Distanz zwischen dem konkret betrachteten 3D-Objektpunkt  $O_k$  und der dreiecksbasierten Oberflächenrepräsentation der „Ground-Truth“-Daten definiert. Darauf aufbauend ergibt sich die 3D-Standardabweichung  $\sigma^{3D}$  durch

$$\sigma^{3D}(\{O_k\}) = \sqrt{\text{Var}(\{\epsilon^{3D}(O_k)\})} . \quad (4.1)$$

Als Grundlage für die Betrachtung verschiedener System- und Messparameter werden in den folgenden zwei Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 Vergleiche zwischen verschiedenen Verfahren zur Gewinnung dreidimensionaler Objektkoordinaten  $O_k$  aus Bilddaten eines Aufnahmezeitpunktes  $n$  gezogen. Dabei werden Resultate einer eindimensionalen Frequenzfilterung, im Folgenden als 1D-FT bezeichnet, einer zweidimensionalen Frequenzfilterung – 2D-FT –, sowie fensterbasierten, also Teilbilder analysierenden Ansätzen – 2D-AWFTP, 2D-WFT und 2D-AWFT – präsentiert. Tabelle 4.2 stellt die in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Verfahren konkret gegenüber.

Tabelle 4.2: Eigenschaften verschiedener auf Fouriertransformation von Interferogrammen basierender Verfahren zur Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten auf Datenbasis eines Aufnahmezeitpunktes  $n$ . Dabei sind durch „SSSA“ die in Abschnitt 3.2.1.4 beschriebene „Stereo-Single-Shot-Analyse“, sowie die „Fourier-Transformations-Profilometrie“ von Takeda und Mutoh [Tak83] durch „FTP“ abgekürzt. Die Bezeichnungen zur Bandpassbreite sind visualisiert Abbildung 3.2 (b) zu entnehmen.

	1D-FT	2D-FT
Filterdimension	eindimensional	zweidimensional
Filtergröße	global	global
Systemaufbau	SSSA (2 Kameras, 1 Projektor)	SSSA (2 Kameras, 1 Projektor)
Bandpassbreite	$[f_0 - \epsilon_{\min}, j \cdot f_0 + \epsilon_{\max}]$	$[f_0 - \epsilon_{\min}, j \cdot f_0 + \epsilon_{\max}]$
3D-Datenbestimmung	$\phi_{\text{abs},n}$ -Triangulation	$\phi_{\text{abs},n}$ -Triangulation

	2D-AWFTP	2D-WFT	2D-AWFT
Filterdimension	zweidimensional	zweidimensional	zweidimensional
Filtergröße	adaptiv fensterbasiert	fensterbasiert	adaptiv fensterbasiert
Systemaufbau	FTP (2 Kameras, 1 Proj.)	SSSA (2 Kameras, 1 Proj.)	SSSA (2 Kameras, 1 Proj.)
Bandpassbreite	$f_0 \pm \epsilon_{\min/\max}$	$[f_0 - \epsilon_{\min}, j \cdot f_0 + \epsilon_{\max}]$	$[f_0 - \epsilon_{\min}, j \cdot f_0 + \epsilon_{\max}]$
3D-Datenbestimmung	$\phi_{\text{abs},n}$ -Vergleich zu Referenzebene	$\phi_{\text{abs},n}$ -Triangulation	$\phi_{\text{abs},n}$ -Triangulation

### 4.3.1 Globale 1D- und 2D-Fourieranalyse

Dieser Abschnitt betrachtet den Einfluss eindimensionaler gegenüber zweidimensionaler, diskreter Fouriertransformation zur Frequenzanalyse von Interferogrammen. Dabei werden die 3D-Ergebnisse in Abhängigkeit der Systemparameter Bildpunktanzahl und Anzahl projizierter  $(1 + \cos)$ -Perioden dargestellt. Alle verwendeten, synthetischen Bilddaten besitzen eine quadratische Ausdehnung mit minimal  $256 \times 256$  Pixel und maximal  $2.048 \times 2.048$  Pixel. Weitere analysierte Bildpunktanzahlen sind  $384^2$  Pixel,  $512^2$  Pixel,  $1.024^2$  Pixel, sowie  $1.536^2$  Pixel. Für die Anzahl projizierter  $(1 + \cos)$ -Perioden werden die Zweierpotenzen 32, 64 und 128 verwendet, was bei einer Bildauflösung von  $1.024 \times 1.024$  Pixel einer Periodenbreite von 32, 16 respektive 8 Pixel in der Projektebene entspricht.

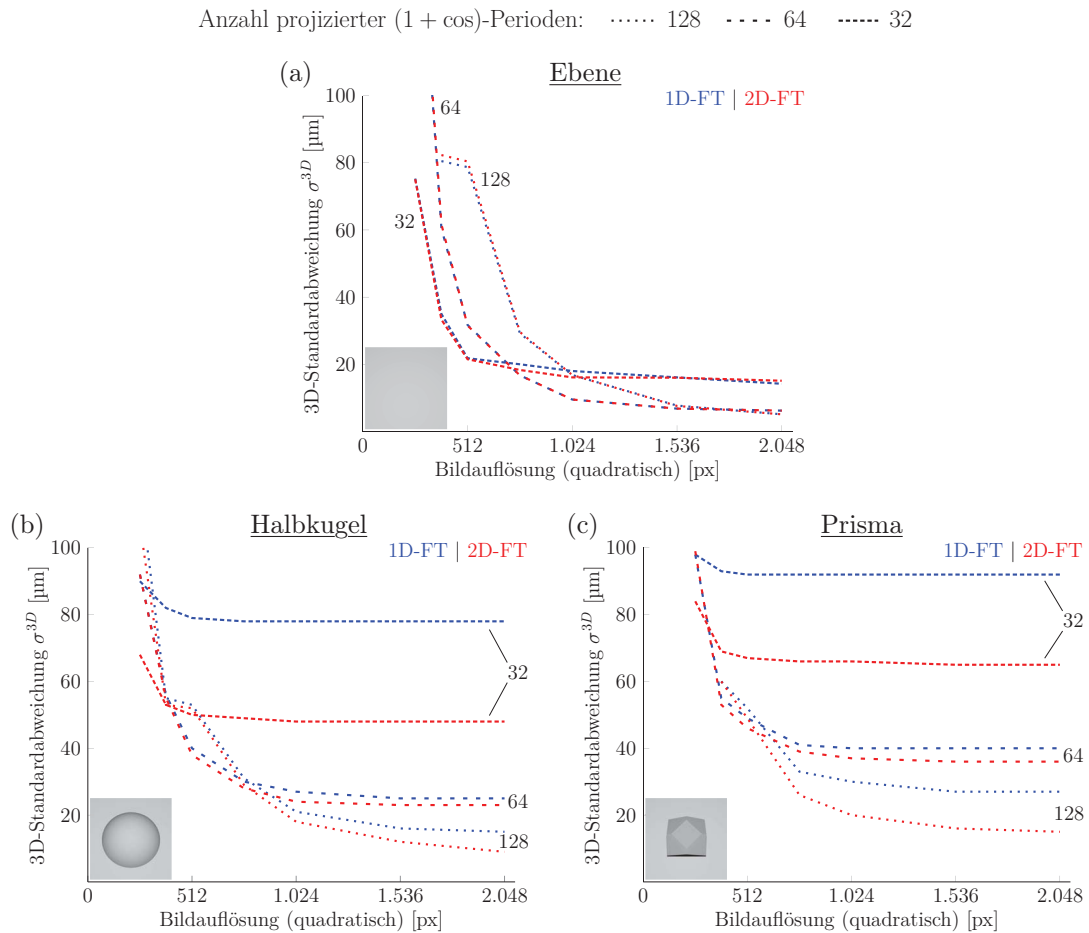


Abbildung 4.3: 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  für quadratische Bildauflösungen zwischen  $256^2$  und  $2.048^2$  Pixel. Die jeweils zugrunde liegende Anzahl projizierter  $(1 + \cos)$ -Perioden ist den Graphen annotiert und wie folgt codiert: gepunktet  $\rightarrow$  128 Perioden, weit gestrichelt  $\rightarrow$  64 Perioden, eng gestrichelt  $\rightarrow$  32 Perioden. Die verschiedenen Verfahren zur Frequenzanalyse sind mit blau für eine eindimensionale Fouriertransformation (1D-FT) und rot für die zweidimensionale Analyse (2D-FT) farblich differenziert. Das jeweils verwendete Messobjekt ist zusätzlich zur jeweiligen Überschrift symbolisch in jedem Diagramm integriert: (a) Ebene, (b) Halbkugel, (c) prismatischer Körper.

Allgemein lässt sich aus den in Abbildung 4.3 visualisierten 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  schlussfolgern, dass mit steigender Bildpunktanzahl (Bildauflösung in Pixel) eine größere Anzahl an  $(1 + \cos)$ -Perioden Vorteile für die Einzelbildanalyse mithilfe der Fouriertransformation bietet. Dies gilt unabhängig der Filterdimension – ein- oder zweidimensional. Eine Auswertung von 128 Perioden verteilt auf eine quadratische Bildausdehnung von  $256 \times 256$  Pixel ist nicht möglich, da ein nomineller schwarz-weiß-Wechsel von Bildpunkt zu Bildpunkt keine unterscheidbaren Frequenzen bereitstellt. Die weiteren für die kleinste betrachtete Bildauflösung  $256 \times 256$  Pixel dargestellten Ergebnisse basieren auf 3D-Punktwolken  $\{O_k\}$ , welche gegenüber dem entsprechenden „Ground-Truth“-Modell ausschließlich Vollständigkeits zwischen 79 und 89 Prozent besitzen. Dabei sind insbesondere im Randbereich fehlende Daten festzustellen.

Im Vergleich der beiden Herangehensweisen – Frequenzanalyse und -filterung in ausschließlich einer Richtung (1D-FT) gegenüber der zweidimensionalen Signalbetrachtung (2D-FT) – ergeben sich signifikante Vorteile bei zweidimensionaler Analyse. Diese Signifikanz steigert sich mit der Komplexität des betrachteten Messobjektes. So sind die Resultate der Auswertung einer Ebene für eindimensionale und zweidimensionale Fouriertransformation bis auf marginale Differenzen als identisch anzusehen. Beim Messobjekt Kugel besitzt die 2D-FT bei der maximal betrachteten Bildpunktanzahl von  $2.048 \times 2.048$  Pixel gegenüber der eindimensionalen Filterung einen Vorteil von 38,5 Prozent bei 32  $(1 + \cos)$ -Perioden, acht Prozent bei 64 Perioden und 40 Prozent bei 128 projizierten Intensitätsverteilungen in  $(1 + \cos)$ -Form. Für das als Prisma bezeichnete Messobjekt ergeben sich folgende Steigerungsraten der 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  berechneter 3D-Punktwolken: 29,3 % bei 32 Perioden, zehn Prozent bei 64 Perioden und 44,4 % bei der Projektion von 128  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen. Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass den Ergebnissen der eindimensionalen Filterung die Kenntnis der Richtung der Intensitätsverteilungen zugrunde liegt. Erfolgt die Filterung weitgehend parallel zur Streifenausdehnung und damit nicht approximativ orthogonal zur trigonometrischen Intensitätsverteilung, ist, wie in Abschnitt 3.2.1.3 beschrieben, keine Trennung von Grund- und Musterfrequenzen möglich, die Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten ausgeschlossen.

Für die Betrachtung weiterer Einflussfaktoren und Systemparameter zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten  $O_k$  aus Stereo-Bildanalysen eines Aufnahmezeitpunktes  $n$ , sowie im Weiteren der Verwendung dieser Daten zur 3D-Bewegungsdetektion und -kompensation sollen folgende Parameterwerte entsprechend der bisher erzielten Ergebnisse fixiert werden:

- Bildauflösung (quadratisch) in Pixel:  $1.024 \times 1.024$
- Anzahl projizierter  $(1 + \cos)$ -Perioden: 64 ( $\equiv 16 \text{ px} / \text{Periode bei } (1.024 \text{ px})^2 \text{ Projektion}$ )

Damit ergibt sich die bestmögliche Kombination aus Genauigkeit und beanspruchter Rechenkapazität, welche mit verdoppelter Bildauflösung um den Faktor 8 ansteigt. Bedingt durch die aufgezeigten Vorteile einer zweidimensionalen Frequenzanalyse und -filterung, insbesondere bei komplexeren Messobjektstrukturen, soll im Weiteren die Betrachtung auf das als 2D-FT bezeichnete Verfahren fokussiert werden. Dies erübrigt des Weiteren die Notwendigkeit zur apriorischen Bestimmung der Richtung der Intensitätsverteilung und ermöglicht ebenso die Analyse zu den Achsen der Kamerabilder signifikant verdrehter  $(1 + \cos)$ -Streifen.

Das visuelle, dreiecksbasierte Resultat einer 3D-Koordinatenbestimmung vom Messobjekt Prisma in Abbildung 4.4 (a) verdeutlicht ein Defizit globaler Frequenzanalysen: Komplexe Spektren  $G(f)$  (Abbildung 4.4 (b)) mit nicht eindeutig differenzierbaren Frequenzpeakausdehnungen

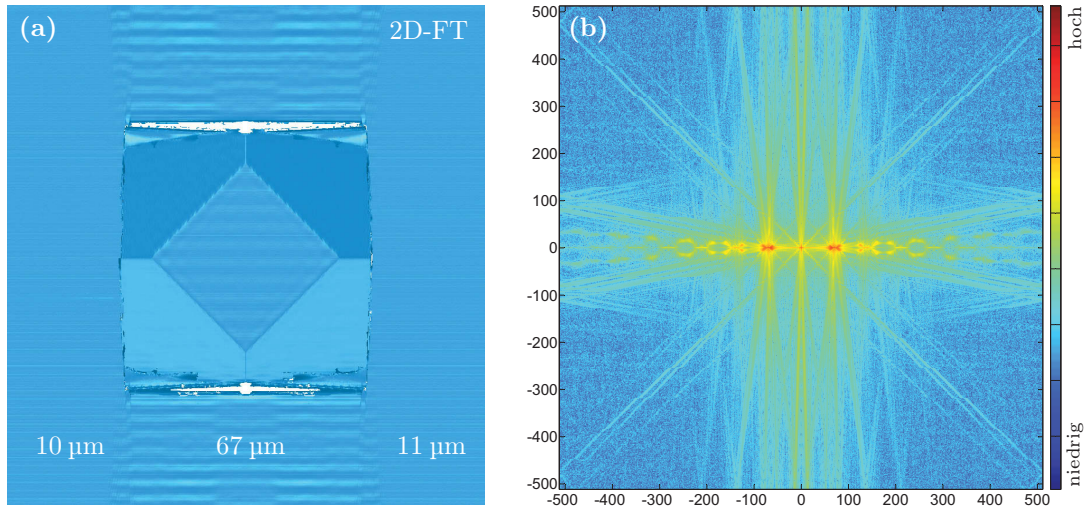


Abbildung 4.4: Defizite einer globalen, zweidimensionalen Frequenzfilterung am Beispiel des prismatischen Messkörpers. (a) Dreiecksbasierte Oberflächenrepräsentation des Messkörpers mit darunterliegender Ebene. Auffällig ist die Wellenbildung, sowie eine um Faktor 6 verschlechterte Standardabweichung der 3D-Fehler  $\sigma^{3D}$  in den planaren Bereichen des Bildabschnittes, in dem sich das Messobjekt befindet. Die Ursache dessen ist in Abbildungsbereich (b) durch das zugehörige Frequenzspektrum veranschaulicht, wobei die Häufigkeit von Frequenzen farblich von blau  $\mapsto$  niedrig bis rot  $\mapsto$  hoch codiert ist. Das Übersprechen einzelner Frequenzpeaks  $Q_i \in [i \cdot f_0 - \epsilon_{\min}, i \cdot f_0 + \epsilon_{\max}]$  in andere Peaks  $Q_j$  (mit  $i \neq j$ ) unterbindet die eindeutige Trennung von Muster- und Texturfrequenzen.

$\epsilon_{\min}(f_i)$  und  $\epsilon_{\max}(f_i)$  führen aufgrund des Gibbs'schen Phänomens [Hew79] zu Wellenbildungen insbesondere in planaren Bereichen der Messszene. Zur Vereinfachung der Frequenzspektren und damit besseren Trennbarkeit einzelner Peaks  $Q_i$  empfiehlt sich eine Segmentierung der Eingabebilder. Resultate dessen werden im folgenden Abschnitt 4.3.2 detailliert dargestellt und diskutiert.

### 4.3.2 Fensterbasierte Fourieranalyse

Die auf Teilbildern  $g_{n,w}^c$  basierte, zweidimensionale Fourieranalyse wird anhand drei verschiedener Verfahren untersucht, deren Eigenschaften bereits in Tabelle 4.2 im unteren System benannt sind. Es handelt sich dabei um die in Abschnitt 3.2.1.6 vorgestellte 2D-WFT, die auf festen, ausschließlich von der Bildauflösung abhängigen Fenstergrößen und sich überlagernden Teilergebnissen basiert. Die beiden anderen Verfahren, 2D-AWFTP und 2D-AWFT, analysieren kontextabhängig rechteckige Fenster, deren zweidimensionale Ausdehnung auf der Größe und Lage von Bildsegmenten basiert, bei denen ausschließlich eine geringe Anzahl unterschiedlicher Sequenzen erwartet wird. Die Bereitstellung derartiger Segmente wird nachfolgend erläutert. 2D-AWFTP und 2D-AWFT differieren primär in der  $\phi_{\text{abs}}$ -Feinphasenauswertung: Während das zweidimensionale AWFTP-Verfahren auf dem Vergleich mit Phasenverteilungen einer Referenzebene  $R$  und ausschließlich einer Ansicht pro Aufnahmezeitpunkt  $n$  arbeitet, werden bei der 2D-AWFT Daten von zwei Kamerapositionen  $c1$  und  $c2$  eines Aufnahmezeitpunktes triangulierend



ausgewertet. Entscheidend für die Ergebnisgenauigkeit an in den Segmenten befindlichen Kanten und 3D-Strukturen ist die verschiedene Herangehensweise der Bandpassfilterung im Frequenzbereich: Während das 2D-AWFTP-Verfahren ausschließlich auf dem Peak  $Q_1$  der Trägerfrequenz beruht, werden bei den zweidimensionalen WFT- und AWFT-Verfahren alle vom Gleichlichtanteil  $Q_0$  verschiedenen Frequenzen in die Auswertung einbezogen (siehe Abbildung 3.2 (b)).

Abbildung 4.5 stellt die auf synthetischen Bilddaten erzielten, dreidimensionalen Ergebnisse als Standardabweichungen  $\sigma$  gegenüber den jeweiligen Ground-Truth-Datensätzen dar. Dabei werden analog zum vorangegangenen Abschnitt 4.3.1 verschiedene Größen der quadratischen Bildauflösung von minimal  $256^2$  Pixel bis maximal  $2.048^2$  Pixel, sowie unterschiedliche Anzahlen projizierter  $(1 + \cos)$ -Perioden (128, 64 und 32) betrachtet. Als Messobjekte finden die Halbkugel und der prismatische Körper Verwendung. Auf eine Analyse der Ebene kann verzichtet werden, da aus offensichtlichen Gründen die Intensitätsbilder  $I_n^c$  aus genau einem Segment bestehen und damit eine globale Filterung wie im vorangegangenen Abschnitt erfolgt. Der besseren Differenzierbarkeit der Ergebnisse für kleinere Bildauflösungen bis einschließlich  $768^2$  Pixel, sind deren Ergebnisse neben der graphischen Veranschaulichung in den Abbildungsteilen (a) und (c), zusätzlich in Tabellenform in den Teilen (b) sowie (d) der Abbildung 4.5 veranschaulicht.

Basis der 2D-WFT-Ergebnisse ist eine Bildteilung in jeder Dimension von  $1/8$ , sowie einer Fensterverschiebung von  $1/8$  der Fenstergröße. Zur Wohlunterscheidbarkeit einzelner Frequenzpeaks  $Q_i$  in den Spektren mit einer Ausdehnung der jeweiligen Fenstergröße, wird die minimale Fenstergröße nach Vorversuchen empirisch mit  $96^2$  Pixel fixiert. Damit ergeben sich für die betrachteten Bildauflösungen der folgenden Tabelle 4.3 entnehmbare Parameter für die Fenstergröße und Fensterverschiebung.

Tabelle 4.3: Fenstergrößen und -verschiebungen für verschiedene Bildauflösungen. Alle Angaben in Pixel [px]; Bildauflösungen und Fenstergrößen sind jeweils quadratisch.

Bildauflösung	256	384	512	768	1.024	1.536	2.048
Fenstergröße	96	96	96	96	128	192	256
Schrittweite	12	12	12	12	16	24	32

Global lässt sich aus den in Abbildung 4.5 dargestellten Ergebnissen ableiten, dass unter Verwendung von 32 und 64 projizierten  $(1 + \cos)$ -Perioden die besten Ergebnisse – 3D-Punktwolken  $\{O_k\}$  mit geringster Standardabweichung über alle 3D-Fehler gegenüber den jeweiligen Ground-Truth-Daten – bei Bildanalyse durch das zweidimensionale WFT-Verfahren ermöglicht werden. Abweichend hiervon ist für 128 projizierte  $(1 + \cos)$ -Perioden das 2D-AWFT-Verfahren bestgeeignet. Ebenso ergeben sich für geringe Bildauflösungen bis  $512^2$  Pixel in Abhängigkeit der Objektkomplexität und der Anzahl projizierter  $(1 + \cos)$ -Perioden leichte Vorteile für die Verfahren mit datengetriebener Fenstergröße.

Im Vergleich zu Ergebnissen der globalen zweidimensionalen Frequenzfilterung (2D-FT) stellen die zwei fensterbasierten Analyseverfahren 2D-AWFT und 2D-WFT, welche analog zur 2D-FT auf einer triangulierenden Feinphasenauswertung und SSSA-Systemanordnung basieren, eine signifikante Verbesserung dar. Das zweidimensionale AWFTP-Verfahren besitzt hingegen im Vergleich zur 2D-FT mit Stereobildgrundlage höhere Standardabweichungen  $\sigma$  der 3D-Fehlern  $\epsilon^{3D}$ , verbessert aber die Resultate gegenüber der 1983 von Takeda und Mutoh [Tak83] vorgestellten globalen FTP-Variante deutlich, wie der Übersicht in Tabelle A.1 im Anhang entnommen werden

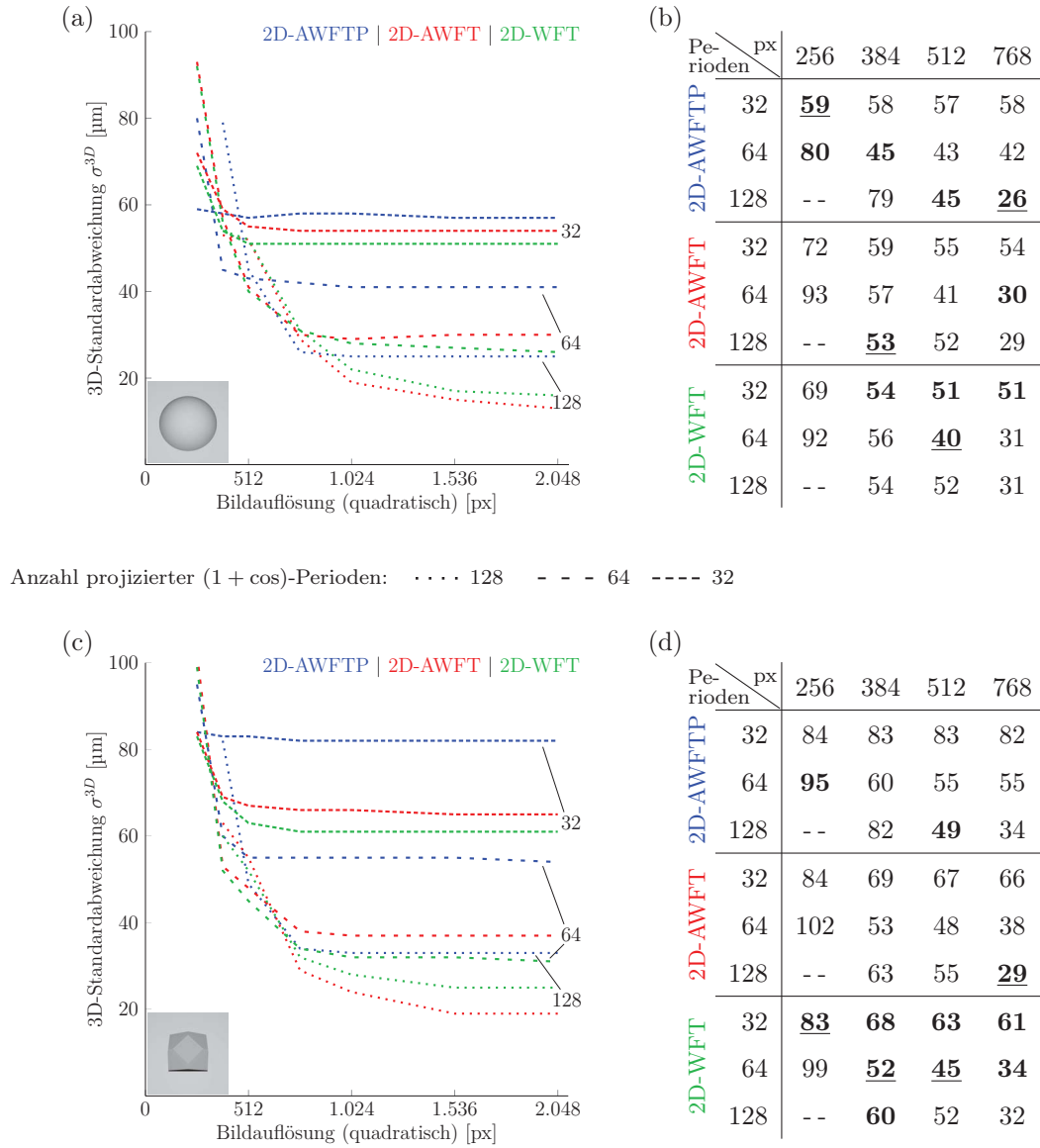


Abbildung 4.5: Analog zu Abbildung 4.3 Visualisierung von 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  für verschiedene, quadratische Bildauflösungen und unterschiedlicher Anzahl projizierter (1 + cos)-Perioden (Codierung: gepunktet → 128 Perioden, weit gestrichelt → 64 Perioden, eng gestrichelt → 32 Perioden). Die fensterbasiert, zweidimensionalen Verfahren zur Frequenzanalyse sind mit blau für ein auf FTP basierendes Verfahren mit adaptiver Fenstergröße (2D-AWFTP), rot für eine auf SSSA basierende Analyse mit adaptiver Fenstergröße (2D-AWFT) und grün einer SSSA-Koordinatenbestimmung mit fester Fenstergröße und Fensterüberlagerungen farblich differenziert. Das jeweils verwendete Messobjekt ist symbolisch in dem jeweiligen Diagramm integriert: (a) Halbkugel, (c) Prisma. Die Tabellen (b) und (d) spiegeln numerisch die Ergebnisse der Bildauflösungen zwischen  $256^2$  und  $768^2$  Pixel für eine gegenüber den Graphen bessere Differenzierbarkeit wider. Speziell hervorgehoben ist pro Bildauflösungsspalte der beste (niedrigste) Wert pro Periodenanzahl durch Fettdruck, der über alle getesteten Periodenbreiten beste Wert durch Fettdruck und Unterstreichung.



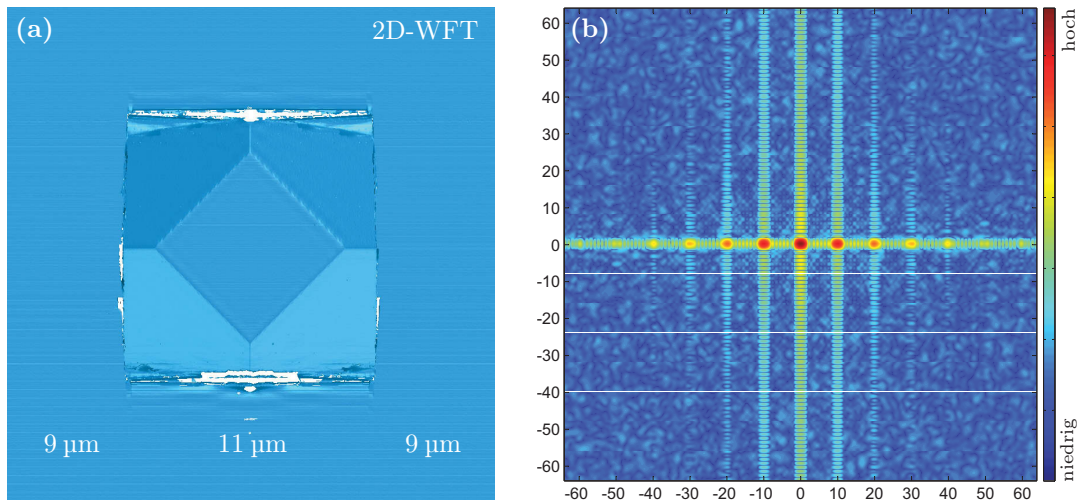


Abbildung 4.6: (a) Dreiecksbasierte Oberflächendarstellung der Minimierung von Wellenstrukturen innerhalb des 3D-Ergebnisses für das Messobjekt Prisma. (b) Beispielhaft das gegenüber Abbildung 4.4 (b) signifikant konzentrierte Frequenzspektrum eines Bildfensters der quadratischen Größe  $128 \times 128$  Pixel ( $1/8$  der jeweiligen Bildausdehnung) im Objektbereich.

kann. Ursache dessen ist die ausschließliche Bandpassfilterung des ersten Frequenzpeaks  $Q_1$ , die bei globaler Bildanalyse zu fließenden, verfälschten Übergängen in Kantenbereichen und an Segmentgrenzen führt, wie in Abbildung A.1 (a) im Vergleich zur adaptiv fensterbasierten 2D-AWFTP in Abbildungsteil (b) visualisiert ist.

Die Vorteile fensterbasierter Bildanalyse sind insbesondere durch vereinfachte Frequenzspektren begründet, wie beispielhaft in Abbildung 4.6 (b) visualisiert. Die Konzentration gleicher oder ähnlicher Frequenzen auf im Vergleich zu Spektren globaler Bildanalyse engere Bereiche und das Nichtvorhandensein einer großen Frequenzstreuung über das komplette Spektrum ermöglichen eine signifikant vereinfachte Trennung der Frequenzpeaks unter anderem vom Gleichlichtanteil  $Q_0$ . Abbildung 4.6 (a) zeigt das 3D-Ergebnis des prismatischen Körpers in dreiecksbasierter Oberflächendarstellung bei einer Bildgrundlage von  $1.024^2$  Pixel Bildauflösung und 64 projizierten  $(1 + \cos)$ -Perioden. Gegenüber der 2D-FT-basierten Darstellung in Abbildung 4.4 ist subjektiv eine signifikant verringerte Wellenausbildung sowohl auf dem Messobjekt als auch der umgebenden Grundebene zu erkennen. Dieser Eindruck schlägt sich auch quantitativ in den Standardabweichungen im Ground-Truth-Modell planarer Szenenbereiche wider.

Auch innerhalb eines Bildsegmentes lassen sich signifikant veränderte Verteilungen der 3D-Fehler  $\epsilon^{3D}$  aufzeigen, wie sie anhand des Prismas in Abbildung 4.7 farbcodiert veranschaulicht sind. Alle drei Abbildungsteile basieren auf dem gleichen Bildmaterial mit  $1.024^2$  Pixel Bildauflösung und 64 projizierten  $(1 + \cos)$ -Perioden. Von links nach rechts spiegeln die 3D-Vergleiche Auswertungen nach dem 2D-AWFTP-Verfahren, dem 2D-AWFT-Verfahren und in Abbildung 4.7 (c) dem 2D-WFT-Verfahren wider. Die markanten Fehler  $\epsilon^{3D} > \pm 100 \mu\text{m}$  am Rand des Prismensegments basieren auf dem Gibbs'schen Phänomen [Hew79], nach dem an Sprungstellen im Eingangssignal Überschwüngen bei der Fourieranalyse auftreten. Diese Überschwüngen zeigen sich durch eine verstärkte Wellenbildung an Objektkanten beziehungsweise Segmenträndern. Durch Anwendung des zweidimensionalen Hammingfilters auf den Interferogrammen beziehungsweise auf

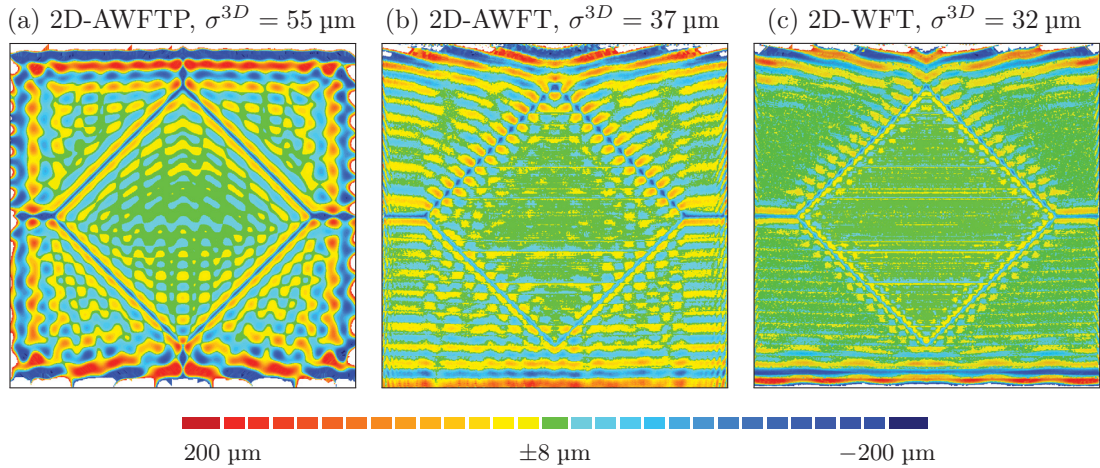


Abbildung 4.7: Verteilung von 3D-Fehlern  $\epsilon^{3D}$  auf dem Messobjekt Prisma bei Verwendung verschiedener Verfahren zur Feinphasenbestimmung: (a) 2D-AWFTP, (b) 2D-AWFT und (c) 2D-WFT. Weiße Bildbereiche entsprechen nicht rekonstruierten Objektteilen. Die 3D-Standardabweichung  $\sigma(\epsilon^{3D})$  des Gesamtobjekts ist jeweils in der Überschrift hinterlegt. Grüne Ergebnisbereiche entsprechen einem 3D-Fehler von  $\epsilon^{3D}(O_k) \leq \pm 8 \mu\text{m}$ . Warme Farbcodierungen von gelb bis rot spiegeln vergrößerte Entfernungen vom Ursprung des zugrundeliegenden Koordinatensystems  $\text{KOS}^{n=1}$  bis zu einer Soll-Ist-Abweichung von  $200 \mu\text{m}$ , kalte Farben im Türkis- bis Blaubereich verkürzte Entfernungen wider.

Teilen dieser, lässt sich das Gibbs'sche Phänomen am Segmentrand verringern. Eine Möglichkeit der signifikanten Minimierung der Überschwingungen stellt die 2D-WFT dar, bei der für fast jede Bildpunktposition  $(x, y)$  durch die Überlappung der Analysefenster vielfach Feinphasen  $\phi_{\text{abs}}$  berechnet und jeweils der Median für die Gesamtfeinphasenkarte genutzt werden. Da sich die Überschwingungen bedingt durch die verschiedene Lage des jeweiligen Analysefensters nach der Fourierhin- und -rücktransformation jeweils an unterschiedlichen Positionen befinden, erfolgt durch die Medianwahl in Grenzen eine Art Glättung. Diese spiegelt sich mit Ausnahme des oberen und unteren Segmentrandes in Abbildung 4.7 (c) insbesondere auf den planaren Flächen wider. Auch die Fehlerwellen an den Flächenkanten innerhalb des Prismas fallen deutlich geringer als bei der Analyse mithilfe der 2D-AWFTP und 2D-AWFT aus.

Folgende Übersicht zeigt Vor- und Nachteile der zweidimensionalen WFT mit fester, ausschließlich von der Bildauflösung abhängiger Fenstergröße und -verschiebung gegenüber der zweidimensionalen AWFT mit datengetriebener Anpassung der Fenstergröße und einmaliger Phasenbestimmung pro Bildpunkt  $(x, y)$  auf:

- signifikant größere zu verarbeitende Datenmenge und damit notwendige Speichergröße, da Medianbestimmung erst nach Abschluss aller Feinphasenberechnungen erfolgen kann
- deutlich höhere Rechenkapazitäten notwendig: Faktor =  $\left( \frac{\text{Fenstergröße}}{\text{Fensterverschiebung}} \right)^2$
- + geringere Standardabweichungen der 3D-Fehler durch Medianbildung über mehrere Feinphasenwerte  $\phi_{\text{abs}}^c$  pro Bildpunkt  $(x, y)$
- + keine inhaltsabhängige Bildsegmentierung notwendig

### 4.3.3 Verwendung von a priori Wissen über das Stereokamerasetup

Eine korrekte  $2\pi$ -Phasenverstetigung zwischen unstetigen Objektbereichen ist unter Anwendung des in Abschnitt 3.2.1.4 vorgestellten Verfahrens von Herráez et al. [Her02] ausschließlich dann gegeben, wenn mindestens ein Pfad von Bildpunkten zwischen diesen Objektbereichen existiert, bei dem alle zueinander benachbarten Bildpunkte einen Phasenunterschied  $\Delta\phi_{\text{rel}} < \pi$  besitzen. Ist diese Anforderung, wie unter anderem bei dem in Abbildung 4.2 (c) visualisierten Messobjekt Prisma inklusive der Untergrundebene nicht gegeben, ist ausschließlich eine getrennte Betrachtung und Phasenverstetigung der zwei Bereiche – Prisma und Untergrundebene – möglich und zur absoluten Positionierung der im Weiteren berechneten 3D-Objektkoordinaten wird pro Objektbereich ein Marker benötigt. Für eine Vielzahl an Objektbereichen innerhalb eines Bildes ergibt sich damit die Notwendigkeit einer Mehrzahl an Markern, welche neben der Herausforderung geeigneter Positionierung zusätzlich eindeutig voneinander trennbar sein müssen.

Alternativ ist an dieser Stelle die  $2\pi$ -Phasenverstetigung auf Basis von Bildsegmentvergleichen, wie sie in Abschnitt 3.2.1.5 dargestellt wurde, denkbar. Resultate hierzu werden im Folgenden gegeben. Dabei lässt sich die Funktionsweise zum einen mithilfe der 3D-Standardabweichung  $\sigma^{3D}$  über die komplette Messszene verifizieren, andererseits anhand einer Eindeutigkeitsfunktion die Robustheit des Verfahrens ermitteln. Den Ausführungen in Abschnitt 3.2.1.5 folgend, sollte diese Robustheit durch Anpassungen der Konfiguration des 3D-Sensors variiert und gegenüber des Standards, der zentrierten Position des Projektionssystems zwischen beiden Kameras  $\zeta_{KP} = \frac{1}{2} \cdot \zeta_{KK}$ , verbessert werden können. Die Eindeutigkeit  $EK$  bestimmt sich bei den folgenden Darstellungen aus der Anzahl von Bildpunkten der Rückprojektion mit denen des zugehörigen Segments im zweiten Kamerabild bei korrekter  $2\pi$ -Phasenverstetigung  $\ddot{U}LP_{\text{max}}$  und der nächstgrößeren Anzahl an Überlagerungsbildpunkten  $\ddot{U}LP_{\text{max}-1}$  für ein alternatives Vielfaches von  $2\pi$  für einen anderen Korrespondenzpunktkandidaten. Formal ist dies durch Gleichung (4.2) beschrieben:

$$EK = \frac{\ddot{U}LP_{\text{max}} - \ddot{U}LP_{\text{max}-1}}{\ddot{U}LP_{\text{max}}} \cdot 100\% . \quad (4.2)$$

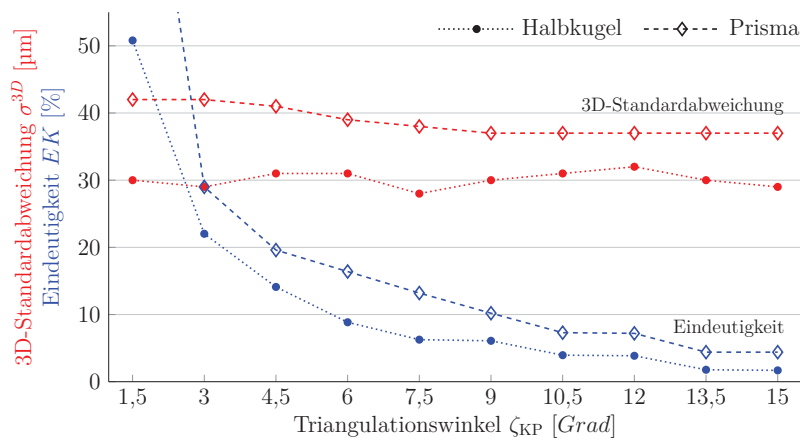


Abbildung 4.8: 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  und Eindeutigkeitswerte  $EK$  für verschiedene Triangulationswinkel  $\zeta_{KP}$  zwischen Projektionssystem und der nächstgelegenen Kamera im Bereich  $[1,5^\circ, 15,0^\circ]$ . Für die Auswertung wurden Kamerabilder mit einer Bildpunktanzahl von  $1.024^2$  Pixel, ein Stereokamerawinkel  $\zeta_{KK}$  von 30 Grad, sowie das 2D-WFT-Verfahren zur Frequenzanalyse verwendet.

Den Ergebnissen in Abbildung 4.8 kann entnommen werden, dass die 3D-Standardabweichung berechneter 3D-Punktwolken für beide getesteten Messobjekte weitgehend unabhängig von der Konfiguration des 3D-Sensors ist. Dem entgegengesetzt steigt die Eindeutigkeit  $EK$  mit Verkleinerung des Triangulationswinkels  $\zeta_{KP}$  zwischen einer Kamera und dem Projektionssystem stetig an. Empirisch hat sich eine Eindeutigkeit von  $EK \geq 10$  Prozent als für zuverlässige  $2\pi$ -Phasenverstetigungen hinreichend erwiesen. Dies ist für Systemanordnungen mit  $\zeta_{KP} < 9$  Grad beim Messobjekt Prisma, sowie für  $\zeta_{KP} < 6$  Grad bei der Halbkugel gegeben.

Unter Berücksichtigung des in Abschnitt 3.2.1.5 beschriebenen, signifikanten Anstieges der Messunsicherheit bei kleinen Triangulationswinkeln, wird der Einsatz bis zu einer Sättigung möglichst großer Triangulationswinkel  $\zeta_{KP}$  zur Vermeidung fehlerhafter Zuweisungen von Kamera-Kamera-, sowie Kamera-Projektor-Korrespondenzkandidaten empfohlen. Für Messobjekte unbekannter 3D-Oberflächenstruktur wird ein Verhältnis von  $\zeta_{KK}/\zeta_{KP} \approx 1/4$  festgesetzt.

## 4.4 Bestimmung von 6D-Bewegungsvektoren mit libicp

Basis der dreidimensionalen Bewegungskompensation zur dynamischen Vermessung makroskopischer Objekte mit einer Temporärtextur in  $(1 + \cos)$ -Form ist eine robuste, präzise Bewegungsschätzung zwischen je zwei Aufnahmezeitpunkten  $n$ . Diese Bestimmung der sechsdimensionalen Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$  basiert, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, auf der Berechnung einer dreidimensionalen Objektrepräsentation  $\{O_k^n\}$  für jeden Aufnahmezeitpunkt  $n$ . Zwischen zeitlich aufeinander folgenden Objektrepräsentationen wird mithilfe eines ICP-basierten Algorithmus das entsprechende Bewegungsvektorfeld  $T_{n,n-1}^{6D}$  des in sich starren Messobjektes ermittelt. Als Implementierung des ICP-Ansatzes wird die frei verfügbare Bibliothek „libicp“ von Geiger et al. [Gei12] verwendet.

Zur Ermittlung von Bewegungsvektorfeldern minimiert der ICP-Ansatz die Summe aller Punkt-abstände  $O_i^n - O_j^{n-1}$ . Bei ungleicher Anzahl an Punkten innerhalb beider 3D-Punktwolken  $\{O_k^n\}$  und  $\{O_k^{n-1}\}$  und zur Vermeidung großer Distanzsummanden fehlerhaft bestimmter Objektpunkte  $O_k$  ist eine Elimination sowohl von sogenannten Ausreißern, als auch nicht in beiden Punktwolken vorkommender Elemente zwingend erforderlich. Von der Parametrisierung der Elimination und der Vorgehensweise zur Distanzbestimmung ist die Genauigkeit der  $T^{6D}$ -Bestimmung abhängig. Diese erzielbare Genauigkeit ist mit Datensätzen der vorliegenden Arbeit untersucht und im Folgenden dargestellt sowie diskutiert.

Ausgangspunkt einer ersten Untersuchung ist die Ground-Truth-Punktwolkenrepräsentation des prismatischen Körpers von Abbildung 4.2 (c), welche mithilfe des 3D-Inspektionsprogramms „Geomagic Qualify 12“ [Geo14] sowohl Translationsbewegungen, als auch Rotationen unterzogen wurde. Die Bewegung zwischen den 3D-Punktwolken wird dabei zwischen 1 und 50 mm beziehungsweise 1 und 50 Grad entlang respektive um jede in der Auswertung genannten Achse des KOS<sup>Welt</sup> variiert. Weitere Stützstellen der Auswertung sind 2, 3, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5, 25, 30, 35, 40, 45 und 50 mm beziehungsweise Grad. Die induzierte Sollbewegung erfolgt jeweils entlang beziehungsweise um jede einzelne Achse  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ , die Zweiachskombinationen  $XY$ ,  $XZ$  und  $YZ$ , sowie die einzig mögliche Dreiachsverknüpfung  $XYZ$ . Somit ergeben sich sieben verschiedene Bewegungsrichtungen pro Bewegungsform (Translation und Rotation), deren Ergebnisse für die Auswertung und Darstellung in Abbildung 4.9 zu folgenden, am Beispiel der Richtungsbeilegung der  $X$ -Achse beschriebenen Anteilen kombiniert sind. Der Faktor  $\frac{18}{14}$  in Gleichung (4.3) ergibt sich aus der Zielstellung eines Gesamtanteils von eins.

$$\begin{aligned}
& \left( \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot X + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot XY + \frac{1}{2} \cdot XZ \right) + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot XYZ \right) \cdot \frac{18}{14} \\
&= \left( \frac{1}{3} \cdot X + \frac{1}{6} \cdot XY + \frac{1}{6} \cdot XZ + \frac{1}{9} \cdot XYZ \right) \cdot \frac{18}{14} \quad .
\end{aligned} \tag{4.3}$$

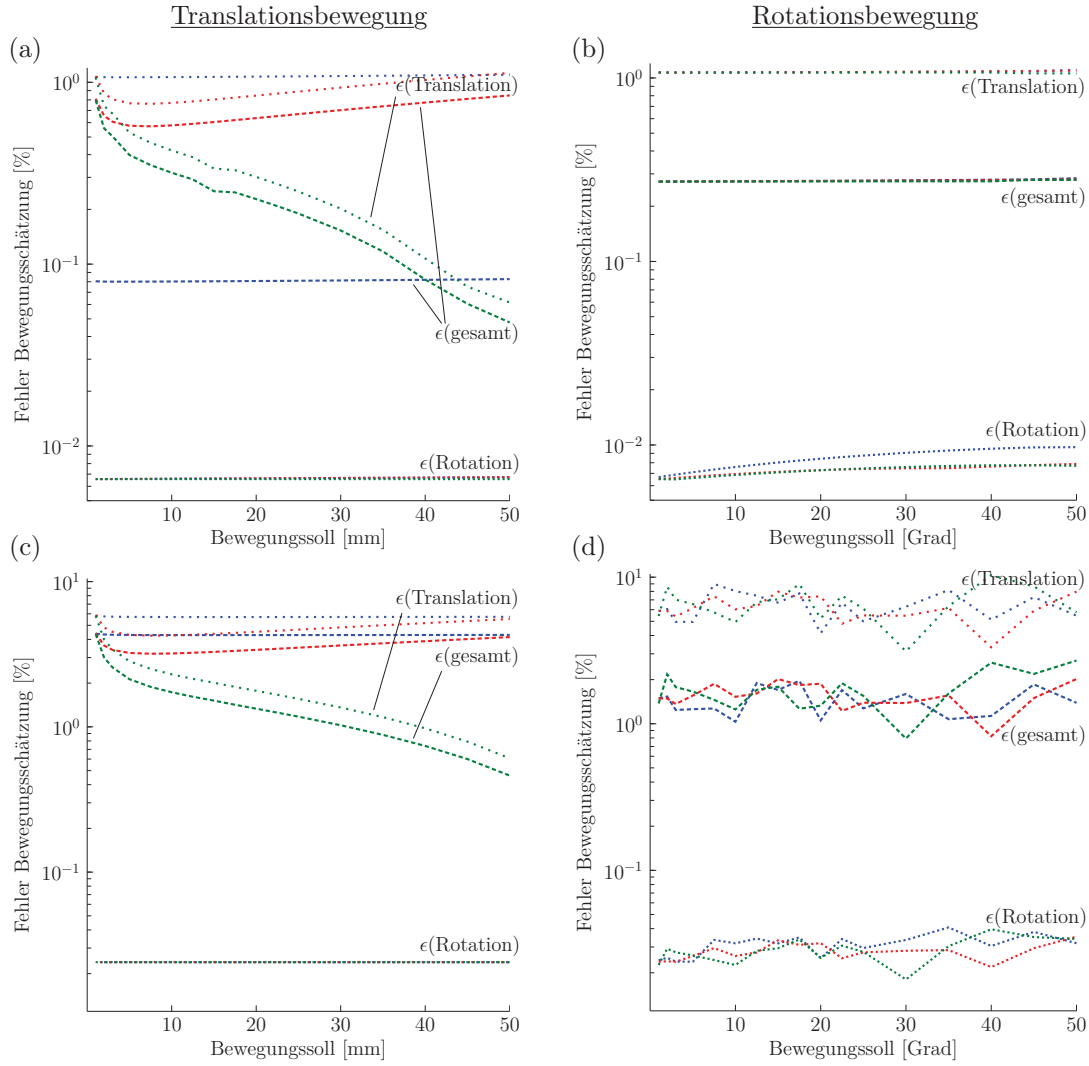


Abbildung 4.9: Einfluss der Bewegungsgröße auf die Genauigkeit der dreidimensionalen Bewegungsschätzung unter Anwendung des ICP-Algorithmus der *libicp*-Bibliothek. Die Diagramme (a) und (b) spiegeln Resultate von bewegten Ground-Truth-Datensätzen wider, die Abbildungsteile (c) und (d) basieren auf 3D-Punktwolken mit einer 3D-Standardabweichung von approximativ  $\sigma^{3D} = 25 \mu\text{m}$  und einer Vollständigkeit von  $V \approx 90$  Prozent. Die induzierten Bewegungsformen unterschieden sich zwischen (a) und (c) für reine Translationen und (b) und (d) für Rotationsbewegungen. Die Farbcodierung entspricht der jeweils primären Achsenbeteiligung: blau  $\mapsto$  X-Achse, rot  $\mapsto$  Y-Achse, grün  $\mapsto$  Z-Achse. Verschiedene Bewegungsanteile sind durch die Punktierungsweite codiert: eng gepunktet  $\mapsto$  Rotationsfehler, weiträumig gepunktet  $\mapsto$  Translationsfehler, eng gestrichelt  $\mapsto$  gewichteter Gesamtfehler.



In den Diagrammen von Abbildung 4.9 sind sowohl der Bestimmungsfehler der  $3 \times 3$ -Rotationsmatrix  $R^{\text{ICP}}$  (eng gepunktet), des  $3 \times 1$ -Translationsvektors  $t^{\text{ICP}}$  (weiträumig gepunktet), als auch gewichtet der Gesamtfehler (eng gestrichelt) visualisiert. Die Wichtung ergibt sich dabei auf der Bewegungsform basierend zu 75 % Rotationsfehler + 25 % Translationsfehler bei induzierter Rotation, sowie umgekehrt 25 % Rotationsfehler + 75 % Translationsfehler bei induzierter Translation. Das bei Anwendung von ICP-Algorithmen unabhängig der zugrundeliegenden Bewegungsform jeweils Rotations- als auch Translationsanteile in der Bewegungsschätzung ermittelt werden ist ohne Zuhilfenahme von Vorwissen unvermeidbar. Die einzelnen, in die Auswertung eingeflossenen Fehlerwerte für die Rotationsmatrix  $R^{\text{ICP}}$  und den Translationsvektor  $t^{\text{ICP}}$  sind jeweilige Mittelwerte aus den absoluten Einzeleintragsdifferenzen zum entsprechenden Sollwert. Der Rotationsfehler entspricht also dem Mittelwert der neun Einzeldifferenzen  $R_{(1,1)}^{\text{ICP}} - R_{(1,1)}^{\text{Soll}}, \dots, R_{(3,3)}^{\text{ICP}} - R_{(3,3)}^{\text{Soll}}$ , der Translationsfehler analog dem Mittelwert aus drei Einzeldifferenzen zwischen  $t^{\text{ICP}}$  und  $t^{\text{Soll}}$ . Zur Interpretation der in Abbildung 4.9 dargestellten Auswertungsergebnisse sei auf die logarithmische Skalierung der Ordinaten hingewiesen.

Den in Abbildung 4.9 visualisierten Resultaten lässt sich in Summe eine maximale Abweichung von 1,13 % entnehmen. Dabei sind die Fehler bei der Bestimmung des Translationsvektors  $t^{\text{ICP}}$  etwa eineinhalb Größenordnungen höher, als die Abweichungen der Rotationsmatrix  $R^{\text{ICP}}$ . Unter Ausschluss der Fehlerfunktion bei induzierter Translationsbewegung mit primärer Z-Achsenbeteiligung (grün) weisen die Fehlerfunktionen Linearität auf, es besteht eine Unabhängigkeit des Bestimmungsfehlers von der Größe induzierter Bewegung. Für Translationsbewegungen mit primärer Z-Achsenbeteiligung, was in der Kameraabbildung einer Skalierung entsprechend würde, ist mit steigender Bewegungsgröße eine eindeutigere Trennung zwischen Rotations- und Translationsanteil gegeben, worauf der Translationsfehler  $\epsilon(t^{\text{ICP}})$  von 1,07 % bei 1 mm Bewegung auf 0,07 % bei 50 mm Bewegung signifikant reduziert werden kann.

Insgesamt können die in Abbildung 4.9 (a) und (b) dargestellten Abweichungen bei der Bewegungsschätzung im dreidimensionalen Raum als verfahrensspezifisch angesehen und weitere Ergebnisse in dessen Bezug eingeordnet werden.

In einer zweiten Untersuchung werden die je zwei zur Bewegungsschätzung verwendeten 3D-Punktwolken mit Artefakten der im Abschnitt 4.3 ermittelten Größenordnungen versehen. Als erste Punktwolke wird der Ground-Truth-Datensatz des Prismas verwendet. Die zweite Punktwolke besitzt neben der mithilfe von „Geomagic Qualify 12“ induzierten Bewegung eine 3D-Standardabweichung von  $\sigma^{3D} = 25 \mu\text{m}$ , sowie eine approximative Vollständigkeit von  $V \approx 90 \%$ . Analog zur Auswertungsweise und Ergebnisdarstellung von artefaktfreien Eingabedaten, sind die Resultate dieser Untersuchungsreihe in den Abbildungen 4.9 (c) und (d) visualisiert.

Grundsätzlich liegen die erzielten Abweichungen zur Ground-Truth-Bewegung im Vergleich zu artefaktfreien Eingabedaten eine Größenordnung höher. Der Maximalwert der durchgeführten Auswertungen liegt bei 10,32 %. Für induzierte Translationsbewegungen sind näherungsweise gleiche Funktionsverläufe zwischen fehlerbehafteten und artefaktfreien Eingabedaten festzustellen: Die Mehrheit der Fehler der Bewegungsschätzung ist unabhängig vom Betrag des Bewegungssolls, einzig die primäre Translation entlang der Z-Achse bewirkt eine Fehlerreduktion mit steigendem Bewegungsbetrag. Bei der Verwendung von Rotationsbewegungen ergeben sich für verschiedene Bewegungsbeträge schwankende Fehlerwerte  $\epsilon(R^{\text{ICP}})$  sowie  $\epsilon(t^{\text{ICP}})$ . Im Mittel wird die Rotation mit einem Fehler von 0,71 % bestimmt. Des Weiteren ergibt sich ein gemittelter Fehler von 7,33 % für den Soll-Translationsvektor von  $t^{\text{Soll}} = (0, 0, 0)^T$ , so dass mit einer Wichtung von 3 zu 1 von Rotations- und Translationsfehler ein Gesamtfehler von 2,32 % existiert.

## 4.5 Lokale Bestimmung von Beleuchtungsparametern

Für die Sequenzauswertung von Interferogrammen  $I^c$  in statischen Messsituationen wird grundsätzlich die Annahme getroffen, dass die in Gleichung (1.1) benannten Beleuchtungsparameter  $a$  und  $b$  über die Zeitspanne von Musterprojektion und simultaner Bildaufnahme  $T_{\text{Seq}}$  konstant sind. Diese Annahme kann, wie bereits in Abschnitt 3.3.3 beschrieben und in Abbildung 3.12 beispielhaft für ein rotierendes Prisma veranschaulicht, für dynamische Objektvermessungen aufgrund variabler Beleuchtungsrichtungen nicht aufrecht erhalten werden.

Eine Möglichkeit der Kompensation stellt die Normierung jedes einzelnen Interferogramms  $I_n^c$  dar, welche nach [Win06, Abschnitt 2.2.1] auf Basis eines Interferogramms, eines sogenannten Hell- und eines Dunkelbildes (Definitionen in Abschnitt 1.1) erfolgen kann, wenn alle drei Bilder die gleiche Szenenanordnung abbilden. Diese Voraussetzung wäre für dynamische Messungen ausschließlich dann gegeben, wenn die Bildaufnahme zu einem Zeitpunkt  $t$  aus der gleichen Perspektive erfolgt, weshalb diese Option ausscheidet. Weitere Möglichkeiten stellen die direkte Bestimmung im Prozess der Fourieranalyse, sowie die pixelweise Berechnung entsprechend der Gleichungen (3.17) und (3.18), sowie den Beschreibungen in Abschnitt 3.3.3.2 dar. Zu beiden Optionen sind Ergebnisse, Vorteile, sowie Grenzen in den folgenden Abschnitten veranschaulicht.

### 4.5.1 Direkte Parameterbestimmung im Prozess der Fourieranalyse

Im Gegensatz zum Vorgehen bei der Bestimmung von Rohphasen  $\phi_{\text{rel}}$  als Ausgangspunkt zur Objektkoordinatenberechnung, bei dem verfahrensabhängig der Gleichlichtanteil  $Q_0$  in Verbindung mit allen komplex konjugierten Frequenzen (SSSA) oder alle Frequenzanteile ungleich  $Q_1$  (FTP) eliminiert werden, sind für die Ermittlung der Beleuchtungswerte  $a_n^c$  und  $b_n^c$  die Musterprojektionen innerhalb der Messszene zu entfernen. Dabei werden die Musterprojektionen durch die jeweilige Trägerfrequenz  $f_0$  beschrieben, welche projektions- und blickwinkelabhängig, sowie durch die 3D-Struktur des Messobjektes beeinflusst eine Streuung im Frequenzspektrum besitzt. Existiert eine Überlagerung beziehungsweise ein Übersprechen des Peaks der Trägerfrequenz in Frequenzpeaks der Messszene, ist die Bestimmung der Bandpassgrenzen nicht eindeutig bestimmbar, eine Trennung von Trägerfrequenz und Frequenzen der Messszene nicht eindeutig durchführbar. Insbesondere für komplexe Messobjekte gilt es daher, den Zielkonflikt zwischen zu starker und zu geringer Frequenzelimination aufzulösen. Während bei zu starker Frequenzfilterung Objektstrukturen und damit lokale Beleuchtungsinformationen verloren gehen, bleiben bei zu geringer Elimination Bestandteile der Musterprojektion im Ergebnis erhalten und verfälschen damit dessen Aussage hinsichtlich der Parameter  $a$  und  $b$ .

Abbildung 4.10 zeigt zwei visuelle Ergebnisse mit manuell optimiertem Filterdesign, bei Eingabedaten der Größe  $1.024 \times 1.024$  Pixel und 128 projizierten  $(1 + \cos)$  Perioden. Abweichungen gegenüber dem durch das jeweilige, synthetisch erzeugte Hellbild gegebene Ground-Truth-Modell sind jeweils unten rechts eingeklinkt. Dabei ist der größte Fehlerwert schwarz visualisiert, geringe Fehler sind weiß veranschaulicht. Für beide analysierten Messobjekte ergeben sich insbesondere Fehler in Wellenform am Übergang zwischen der Hintergrundebene und dem Objekt. Dabei sind die Wellen an Kantenübergängen parallel zur  $(1 + \cos)$ -Streifenrichtung langwelliger ausgeprägt, als an Kanten weitgehend orthogonal zur Streifenrichtung. Die maximalen Abweichungen zwischen Hellbild und mittels Fouriertransformation bestmöglich von der Trägerfrequenz befreitem Interferogramm liegen bei der Halbkugel bei 116 Grauwerten, beim Prisma bei 74 Grauwerten. Entsprechend den jeweils unten eingeklinkten Fehlerbildern in Abbildung 4.10 (a) und (b) besitzt

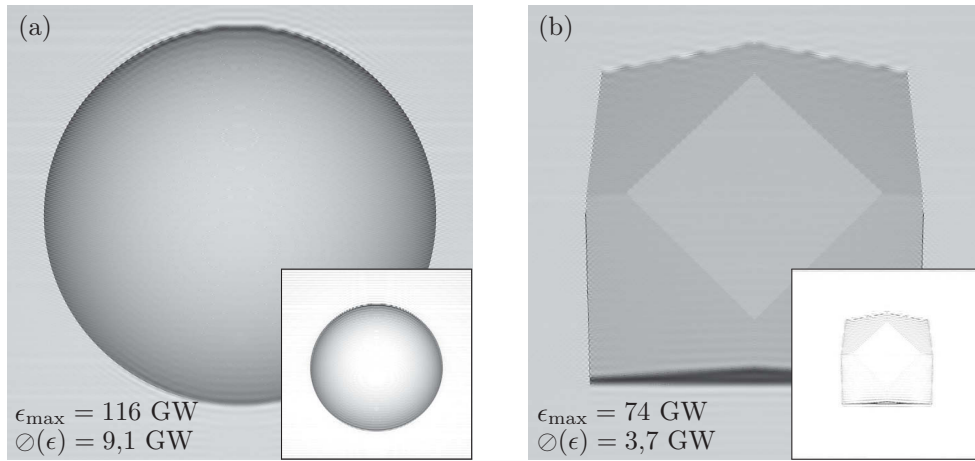


Abbildung 4.10: Visualisierung der Intensitätsbilder  $I_n^c$  nach Elimination der Trägerfrequenzen und ihrer Vielfachen im Spektralbereich von  $Q_1$  bis  $Q_n$  für die Messobjekte (a) Halbkugel und (b) Prisma. Zur vergrößerten Darstellung der Messobjekte sind die Ergebnisbilder auf einen geringen Anteil an Hintergrundebene beschnitten. Im jeweils unten rechts eingeklinkten Bild sind die Abweichungen zwischen Ground-Truth-Daten (zugehöriges Hellbild) und durch Fourieranalyse erzielte Beleuchtungsverteilungen dargestellt. Dabei entspricht eine Codierung in schwarz dem pro Ergebnis maximalen Intensitätsfehler und weiß einer Abweichung von approximativ 0 Grauwerten.

die Beleuchtungsbestimmung durch Fourieranalyse beim Messobjekt Halbkugel eine mittlere Abweichung von 9,1 Grauwerten, beim Messobjekt Prisma fällt dieser mittlere Fehler mit 3,7 Grauwerten um den Faktor 2,5 deutlich geringer aus. Ursache dessen sind die hochfrequenten Änderungen der Objekthelligkeit im stark gekrümmten Randbereich der Halbkugel. Der Hauptfehler für das Messobjekt Prisma liegt im Bereich der unbeleuchteten, aber in das Interferogramm abgebildeten Seitenfläche.

Mit Verringerung der projizierten  $(1 + \cos)$ -Perioden verkleinert sich der Abstand zwischen den Frequenzpeaks  $Q_i$  verschiedener Vielfacher der Trägerfrequenz sowie der Grundhelligkeit  $Q_0$ . Dies beeinflusst signifikant das Filterdesigns beziehungsweise die Trennbarkeit von projizierter Mustertextur und Helligkeitsverteilung. Für 64 respektive 32  $(1 + \cos)$ -Perioden und damit einer Halbierung sowie Viertelung zur bisher betrachteten Periodenanzahl ergeben sich die in Tabelle 4.4 dargestellten Abweichungen gegenüber der jeweiligen Ground-Truth-Helligkeitsverteilung.

Für das Messobjekt Halbkugel lässt sich durch Verwendung einer zu 128  $(1 + \cos)$ -Perioden verringerten Anzahl sowohl die maximale als auch die mittlere Abweichung der im Prozess der Fourieranalyse bestimmten Helligkeitswerte gegenüber dem als solches bezeichneten Hellbild um 3,3 bis 18,2 Prozent leicht senken. Ursache dessen sind betragsmäßig geringere Abweichungen im Übergangsbereich zwischen Halbkugel und Grundebene bedingt durch die größere Streifenbreite. Der prismatische Körper besitzt dem hingegen deutliche kleinere, maximale Objektgradienten im Bezug zum 3D-Sensor, womit objektbedingte Verkrümmungen der Musterprojektion signifikant geringer ausfallen. Unter dieser Voraussetzung zeigt sich verstärkt die Herausforderung des geeigneten Filterdesigns zur Trennung von Trägerfrequenz und Grundhelligkeit. Ergebnis dessen ist ein Anstieg der Abweichungen in den Helligkeitsverteilungen von im Maximum 74 auf 105 Grauwerten und ein Anstieg der Mittelwerte um 139 Prozent.



Tabelle 4.4: Beträgsmäßig maximale und mittlere Abweichungen zwischen der Berechnung von Helligkeitsverteilungen durch Fourieranalyse von Interferogrammen und den als Ground-Truth gegebenen Hellbildern der Messobjekte Halbkugel und Prisma. Die Musterprojektion erfolgte dabei mit 128, 64 sowie 32  $(1 + \cos)$ -Perioden. Der für jedes Messobjekt niedrigste und damit beste Fehlerwert im Maximum sowie im Mittel ist durch Fettdruck hervorgehoben.

	Abweichung	Halbkugel	Prisma
128 $(1 + \cos)$ -Perioden	Maximum	116 Grauwerte	<b>74 Grauwerte</b>
	Mittelwert	9,1 Grauwerte	<b>3,7 Grauwerte</b>
64 $(1 + \cos)$ -Perioden	Maximum	107 Grauwerte	94 Grauwerte
	Mittelwert	<b>7,4 Grauwerte</b>	6,0 Grauwerte
32 $(1 + \cos)$ -Perioden	Maximum	<b>103 Grauwerte</b>	105 Grauwerte
	Mittelwert	8,8 Grauwerte	8,7 Grauwerte

Die zu Abbildung 4.10 äquivalenten Helligkeitsverteilungen und Abweichungen zum jeweiligen Ground-Truth-Hellbild für Intensitätsverteilungen mit 64 sowie 32  $(1 + \cos)$ -Perioden sind der Abbildung A.3 im Anhang zu entnehmen. Des Weiteren zeigt Abbildung A.4 die Frequenzverteilungen für die verschiedenen Periodenanzahlen und damit die Komplexität des Filterdesigns zur Trennung von temporärem Projektionsmuster und grundsätzlicher Helligkeitsverteilung auf.

#### 4.5.2 Grundsätzliche Kompensationsmöglichkeiten

Unterschiede in der Beachtung oder Vernachlässigung von Beleuchtungsvariationen lassen sich am besten an einer parallel zur Kamerabildebene ausgerichteten Ebene aufzeigen, auf welche eine gleichverteilte Intensitätsverteilung in  $(1 + \cos)$ -Form projiziert ist. Die Bildaufnahme wird synthetisch mit starker Randabdunklung von maximal 98 Prozent versehen, welche in geminderter Form bei optischen Komponenten wie der Projektor- und auch Kameralinse ebenfalls anzutreffen ist. Für eine Mustersequenz, bestehend aus vier, jeweils mit  $\Delta\phi_{R_n} = 90^\circ$  phasenverschobenen  $(1 + \cos)$ -Grauwertverteilungen ergeben sich mit paarweise, um jeweils ein Zehntel der Bildbreite verschobener Randabdunklung die in Abbildung 4.11 veranschaulichten Intensitätsbilder.

In Abbildung 4.12 sind die betragsmäßigen Abweichungen der Rohphasen  $\phi_{\text{rel}}$  gegenüber einer Rohphasenbestimmung bei normierten Intensitätsbildern beziehungsweise  $(1 + \cos)$ -Grauwertverteilungen ohne Randabdunklung dargestellt. Abbildungsteil (a) zeigt repräsentativ die erzielten Ergebnisse der mittleren Bildzeile basierend auf Gleichung (3.1) und der Annahme konstanter

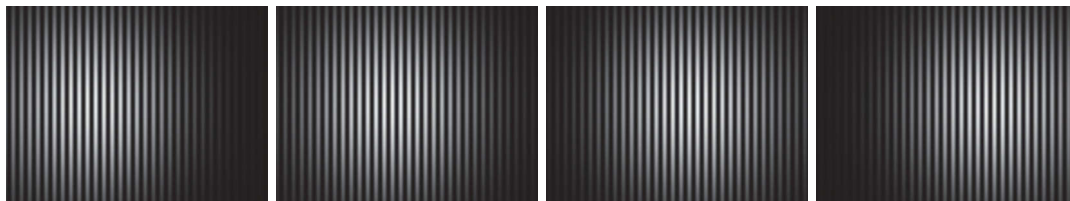


Abbildung 4.11: Sequenz von mit  $\Delta\phi_{R_n} = 90^\circ$  phasenverschobenen  $(1 + \cos)$ -Intensitätsbildern mit paarweise, um jeweils ein Zehntel der Bildbreite verschobener Randabdunklung von maximal 98 Prozent.

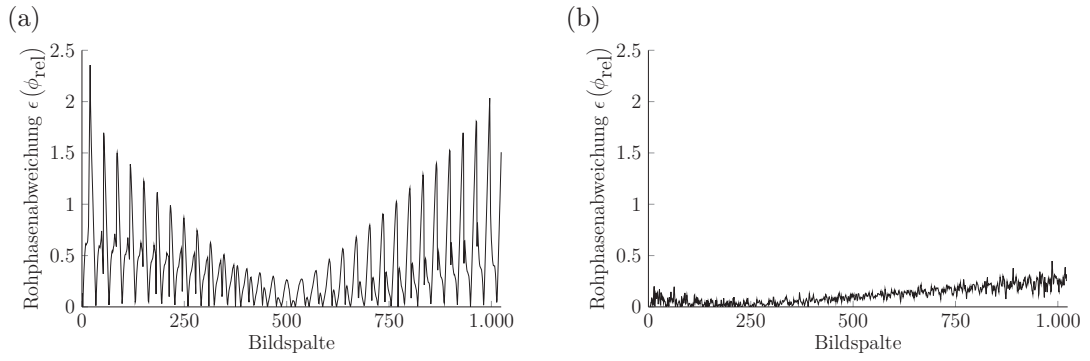


Abbildung 4.12: Betragsmäßige Abweichungen in der Bestimmung von Rohphasen  $\phi_{\text{rel}}$  (a) bei Annahme konstanter Helligkeitsverteilungen während  $T_{\text{Seq}}$ , sowie (b) mit datengetriebener Berechnung lokaler Beleuchtungsparameter. Zur besseren Veranschaulichung sind ausschließlich die Abweichungen der mittleren Bildzeile dargestellt, welche sich nicht signifikant von allen weiteren Bildzeilen unterscheiden.

Beleuchtungsparameter während  $T_{\text{Seq}}$ . In Abbildungsteil (b) sind die Fehler unter Anwendung des in Abschnitt 3.3.3.2 vorgestellten Verfahrens der datengetriebenen, lokalen Bestimmung der Parameter  $a_n^c(x, y)$  und  $b_n^c(x, y)$  veranschaulicht.

Während die Beleuchtungskompensation ausschließlich zu Abweichungen  $|\epsilon(\phi_{\text{rel}})| < 0.5$  führt, sind unter der Annahme konstanter Beleuchtungswerte verstärkt Rohphasenfehler in den Bildrandbereichen festzustellen. Diese Verstärkung der Fehler zum linken und rechten Bildrand hin basiert auf der geringen Modulation beziehungsweise starken Randabdunklung für diese Bereiche in weitgehend allen Eingabedaten. In der Bildmitte, dem Bereich der geringsten Abdunklungseinflüsse, sind die kleinsten Abweichungen festzustellen. Quantitativ lassen sich zwischen beiden Verfahren (Konstanz beziehungsweise Variabilität der Szenenbeleuchtung während  $T_{\text{Seq}}$ ) folgende Unterschiede an dem beschriebenen Grundsatz-Experiment veranschaulichen:

Verfahren / Annahme	Mittelwert der Betragsfehler
Konstanz der Beleuchtung	$0,67 \in [0, \pi)$
lokale Beleuchtungsbestimmung	$0,25 \in [0, \pi)$

Damit entspricht das in Abschnitt 3.3.3.2 beschriebene und an dieser Stelle anhand eines Trivialbeispiels verifizierte Verfahren einer Ergebnisverbesserung beziehungsweise Fehlerminimierung approximativ um Faktor 3.

In den folgenden Abschnitten erfolgt die Anwendung auf komplexere Messobjekte, wobei Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt werden.

#### 4.5.3 Anwendung auf bewegte, makroskopische Objekte

Ausgangspunkt der Verifikation des in Abschnitt 3.3.3.2 beschriebenen Verfahrens zur datengetriebenen, lokalen Beleuchtungsbestimmung ist eine Bildsequenz bestehend aus Hell- und Dunkelbild, je fünf Gray-Code-Bildern pro Projektionsrichtung, sowie je acht  $(1 + \cos)$ -Intensitätsbildern für jede der zwei Projektionsrichtungen. Die Notwendigkeit dieser vollständigen Mustersequenz, basierend auf 16 projizierten  $(1 + \cos)$ -Perioden, bedingt sich aus der Berechnung von Vergleichsergebnissen mithilfe von Algorithmen statischer Messsituationen. Zur Verifikation der Algorithmen

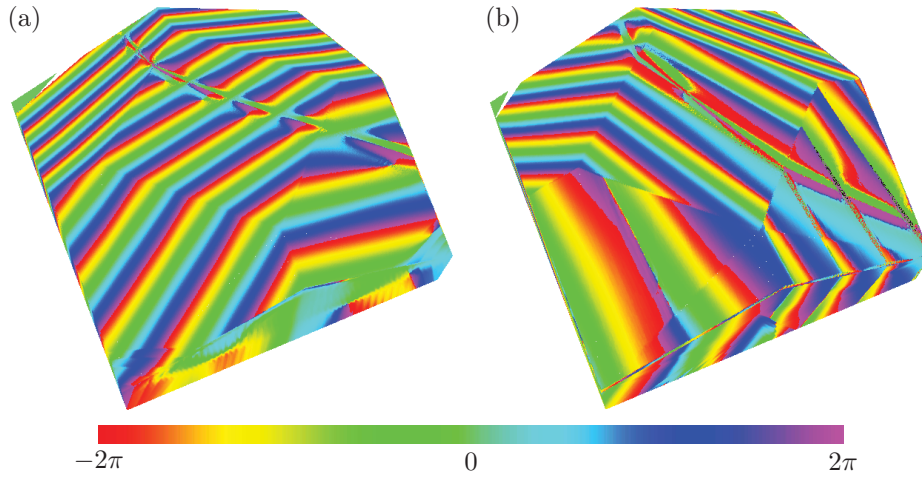


Abbildung 4.13: Ergebnisdarstellung von Rohphasenkarten  $\phi_{\text{rel}}$  bei Annahme konstanter Beleuchtungsparameter über die Zeitspanne der vollständigen Messsequenz  $T_{\text{Seq}}$ , auf der Grundlage bewegungskompensierter Intensitätsbilder  $\bar{I}$ . Teil (a) zeigt die Rohphasenkarte der ersten Projektionsrichtung, (b) die der zweiten.

dynamischer Messvorgänge werden ausschließlich die acht  $(1 + \cos)$ -Intensitätsbilder der ersten Projektionsrichtung genutzt. Der induzierte Phasenschub entspricht  $\Delta\phi_{R_n} = 45^\circ$ . Als Messobjekt wird das in Abbildung 4.2 (c) dargestellte Prisma verwendet, welches über die Zeitspanne der Musterprojektion und Bildaufnahme  $T_{\text{Seq}}$  einer Relativbewegung zwischen je zwei Aufnahmezeitpunkten  $n$  von je zwei Grad Rotation um die X-, als auch Z-Achse ausgesetzt ist. In den Abbildern auf den Kamerasensoren dreht sich das Objekt damit über die Zeit hinweg nach vorn links. Die Darstellungen in Abbildung 3.12 (a) und (b) entsprechen Intensitätsbildern der Aufnahmezeitpunkte  $n = 1$  (Dunkelbild) und  $n = 21$  (erstes  $(1 + \cos)$ -Muster der zweiten Projektionsrichtung), der besseren Veranschaulichung veränderlicher Beleuchtung und Reflexion mit vollständig aktivem Projektor ohne Musterprojektion, dem sogenannten Hellbild.

Abbildung 4.13 zeigt farbcodiert die Rohphasenkarten  $\phi_{\text{rel}}$  der (a) ersten und (b) zweiten Projektionsrichtung. Eine Darstellung von Ergebnissen dreidimensionaler Objektkoordinaten in Form einer diskreten Punktwolke oder einer dreiecksbasierten Oberflächenrepräsentation ist durch das Vorhandensein stark und großflächig ausgeprägter Fehler ausgeschlossen.

Primär ist beiden Ergebnisbildern ein signifikanter Fehler entlang einer gekrümmten Spur zu entnehmen. Diese Spur korrespondiert mit der inversen Bewegungstrajektorie des Prismas. Da die Bewegungskompensation der Intensitätsbilder in Bezug zur Objektposition des ersten Aufnahmezeitpunktes  $n = 1$  erfolgt, ist der Rohphasenfehler für die zweite Projektionsrichtung in Abbildung 4.13 (b) stärker ausgeprägt als die erste in Abbildungsteil (a).

Im Folgenden soll der Einfluss verschiedener Parametrisierungen beziehungsweise Spezialisierungen des in Abschnitt 3.3.3.2 vorgestellten Algorithmus 3.1 zur Lösung des Gleichungssystems (3.17) auf die Bestimmung von Rohphasen veranschaulicht werden. Abbildung 4.14 spiegelt den Einfluss der Anzahl verwendeter, voneinander unabhängiger Wertepaare  $(\bar{I}_n^c(x, y), \Delta\phi_{R_n}^c(x, y))$  zur Bestimmung des Spaltenvektors  $(a, u, v)^T$  in Gleichungssystem (3.17) wider. Dabei wird jeweils von einer quadratischen Umgebung  $[x \pm i, y \pm j]$  des aktuell betrachteten Bildpunktes  $(x, y)$  ausgegangen, welche die Grundlage für die Menge verwendeter Wertepaare  $(\bar{I}_n^c(x, y), \Delta\phi_{R_n}^c(x, y))$  ist.

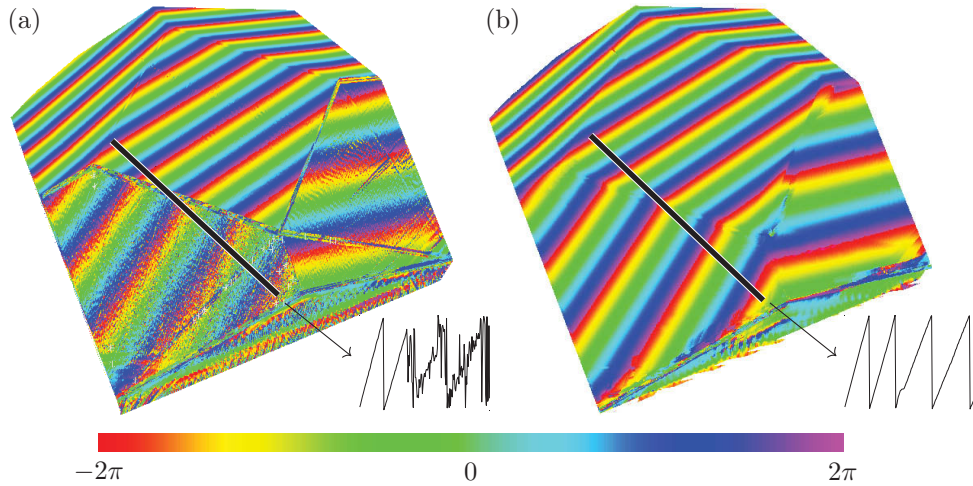


Abbildung 4.14: Lokale Beleuchtungsbestimmung basierend auf  $\left(\overline{I_n^c(x, y)}, \Delta\phi_{R_n}^c(x, y)\right)$ -Tupeln einer quadratischen Umgebung jedes Bildpunktes  $(x, y)$  der Größe (a)  $7 \times 7$  Pixel (ähnlich [Bre13]) beziehungsweise (b)  $31 \times 31$  Pixel. Eine quantitative Auswertung erfolgt entlang der schwarz markierten Strecke; zugehörige Funktionsverläufe an Rohphasenwerten sind pro Rohphasenkarte  $\phi_{\text{rel}}^{c1}$  jeweils unten rechts dargestellt.

Abbildung 4.14 (a) basiert auf einer Umgebungsgröße von  $7 \times 7$  Pixel, womit  $i, j \in [0, 1, \dots, 3]$  gilt. Insbesondere auf den nach vorn (unten) zeigenden Prismenflächen sind deutliche Artefakte in der Rohphasenkarte  $\phi_{\text{rel}}$  zu erkennen. Dies basiert auf den Gegebenheiten, dass diese zwei Flächen zunehmend weniger vom Systemprojektor beleuchtet werden und damit die Modulation der projizierten Intensitätsverteilung sinkt. Zusätzlich erfolgt durch die Rotation um die XZ-Achse in Verbindung mit der Flächenneigung bezüglich des Projektors und der Kamerabildebenen eine verbreiterte Abbildung der  $(1 + \cos)$ -Perioden. Beide Gegebenheiten induzieren verringerte Differenzen an Intensitätswerten zwischen benachbarten Pixeln, welche wiederum zu vergrößerten Unsicherheiten und damit Abweichungen bei der Auflösung des Gleichungssystems (3.17) führen. Visuell spiegelt sich dies in verrauschten Rohphasen wider. Numerisch lässt sich dies durch die Betrachtung der Rohphasenverteilung entlang der in Abbildung 4.14 (a) schwarz gekennzeichneten und im zugehörigen Diagramm rechts unten dargestellten Funktionsverlauf bewerten. So gilt für den Abschnitt der betrachteten Verteilung, welcher auf der Prismenebene vorn links liegt, eine mittlere Rohphasenabweichung im Bezug zur idealen Sägezahnverteilung im Bereich  $[-\pi, \pi)$  von 0,97 beziehungsweise 15 Prozent der maximal zulässigen  $2\pi$ -Abweichung.

Eine Verringerung der Berechnungsunsicherheit lässt sich mit der Verwendung einer größeren Anzahl an Eingabetupeln erzielen. Ein zugehöriges Ergebnis dieses Ansatzes ist mit einer Pixelumgebungsgröße von  $31 \times 31$  Pixel in Abbildung 4.14 (b) dargestellt. Die Verteilung der Rohphasenwerte ist signifikant glatter und entspricht approximativ der idealen Sägezahnverteilung an Phasenwerten im Wertebereich  $[-\pi, \pi)$ . Nachteilig ist der Glättungseffekt an den Kanten, die die einzelnen Deckflächen des Prismas voneinander abgrenzen. Quantitativ lässt sich die Abweichung der resultierenden Rohphasenverteilung entlang der identischen Auswertestrecke über das Prisma wie bei dem Vorgehen mit  $7 \times 7$  Pixel Bildpunktumgebung (ebenfalls im Ergebnisbild schwarz gekennzeichnet und mit einem Funktionsverlauf unten rechts detailliert veranschaulicht) durch folgende Werte charakterisieren: Mittlere Abweichung von 0,07 beziehungsweise 1,2 Prozent der maximal zulässigen Abweichung.

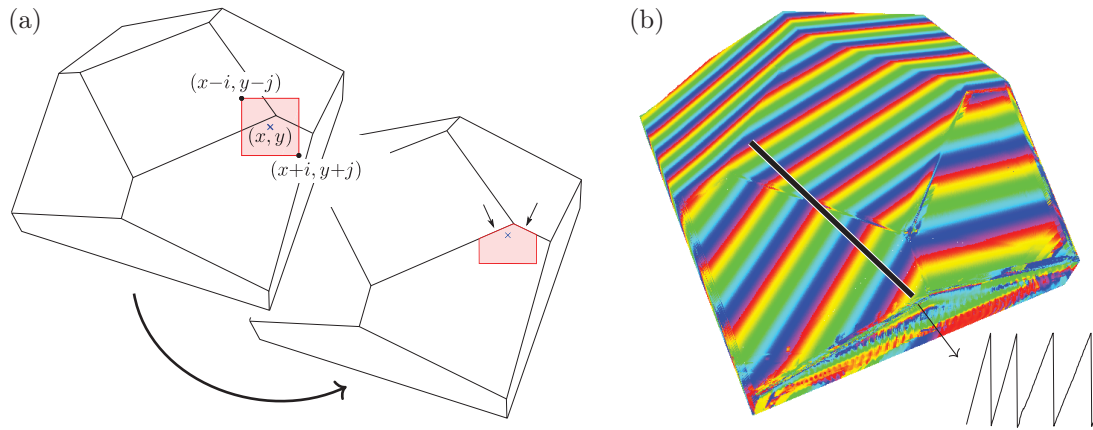
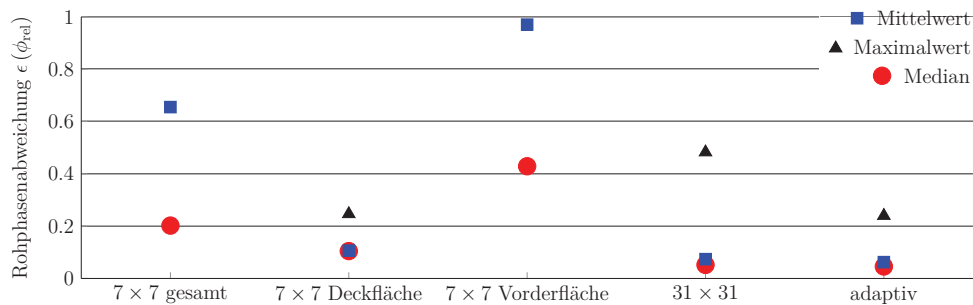


Abbildung 4.15: (a) Unterschiede in der Bildpunktumgebung  $[x \pm i, y \pm j]$  zwischen quadratischer Festlegung (linke Hälfte) und adaptiver Determinierung (rechte Darstellung). Die Beschränkung der Umgebung erfolgt auf Basis einer binären Kantenkarte. (b) Rohphasenkarte  $\phi_{\text{rel}}^1$  bei lokaler Beleuchtungsbestimmung mit adaptiver Größe der Bildpunktumgebung, sowie der zur schwarz markierten Strecke zugehörige Funktionsverlauf an Rohphasenwerten unten rechts.

Diesen Zielkonflikt zwischen möglichst scharfen Kantenbereichen und ansonsten exklusiv der existenten  $2\pi$ -Sprünge glatten Verläufen an Rohphasenwerten gilt es durch eine adaptive Bestimmung der Pixelumgebung  $[x \pm i, y \pm j]$  aufzulösen. Das entsprechende Vorgehen entspricht der Herangehensweise, welche durch die Zeilen 8 – 10 in Algorithmus 3.1 beschrieben, sowie in Abbildung 4.15 (a) in der rechten Hälfte schematisch skizziert ist. Die auf Kantenbildern basierende Einschränkung der Pixelumgebung von  $(x, y)$  ermöglicht eine Verbesserung des Ergebnisses mit quadratischer Pixelumgebung der Größe  $31 \times 31$  Pixel im Mittel um 15 Prozent. Eine konkrete Gegenüberstellung ist in Tabelle 4.5 gegeben.

Tabelle 4.5: Abweichungen der Rohphasenverteilung bei Verwendung einer  $7 \times 7$  Pixel, einer  $31 \times 31$  Pixel sowie einer adaptiven Bildpunktumgebung zur lokalen Beleuchtungsbestimmung gegenüber einer idealen  $\phi_{\text{rel}}$ -Verteilung. Basis der Rohphasenverteilung ist die in den Abbildungen 4.14 und 4.15 (b) jeweils schwarz markierte Strecke.

	gesamt	7 × 7 Pixel		31 × 31 Pixel	adaptiv
		Deckfläche	vordere Fläche		
Mittelwert	0,66	0,11	0,97	0,07	0,06
Maximalwert	5,83	0,25	5,83	0,48	0,24
Median	0,20	0,10	0,43	0,05	0,05





#### 4.5.4 Grenzen bildbasierter Beleuchtungsbestimmung

Der vorgestellte Algorithmus 3.1 besitzt trotz der adaptiven Herangehensweise Grenzen bei der Bestimmung lokaler Beleuchtungsparameter. Dies liegt in der Verwendung einer Bildpunktumgebung begründet, die, wie in Abschnitt 3.3.3.2 bereits theoretisch diskutiert und im vorangegangenen Abschnitt 4.5.3 unter anderem durch Abbildung 4.14 in Verbindung mit den zugehörigen Erläuterungen und numerischen Auswertungen, eine entsprechende Ausdehnung  $[x \pm i, y \pm j]$  besitzen sollte, um als Eingabe für Gleichungssystem (3.18) zuverlässige Parameterwerte  $a_n^c(x, y)$  und  $b_n^c(x, y)$  bereitstellen zu können. Diese entsprechend große Ausdehnung und damit Anzahl an Eingabetupeln  $(\overline{I_n^c(x, y)}, \Delta\phi_{R_n}^c(x, y))$  für Gleichungssystem (3.18) und Gleichung (3.17) ist bei adaptiver Umgebungsgrößenbestimmung insbesondere an Objektkanten nur bedingt gegeben. Existiert in der quadratischen Umgebung von Bildpunkt  $(x, y)$  nur eine Kantenstruktur, so ergibt sich die Vielzahl verwendeter Eingabetupel insbesondere aus den der Kante abgewandten Richtungen. Wird  $(x, y)$  hingegen von mehreren Kantenstrukturen umschlossen, erfolgt adaptiv eine Einschränkung der ursprünglich quadratischen Bildpunktumgebung von mehreren, im Extremfall allen Seiten. Für die Anzahl verwendeter Eingabetupel  $(\overline{I_n^c(x, y)}, \Delta\phi_{R_n}^c(x, y))$  ist dann die Distanz zwischen aktuell betrachtetem Bildpunkt und den umgebenden Kantenstrukturen entscheidend.

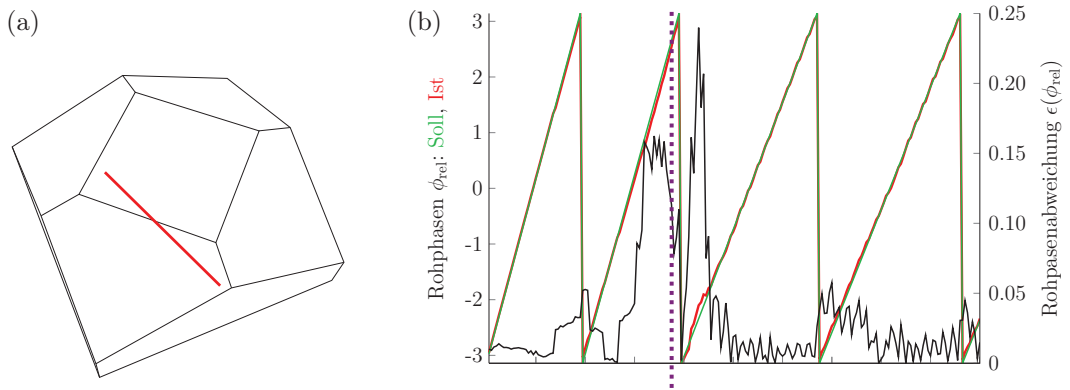


Abbildung 4.16: (b) Abweichungen der Rohphasenwerte  $\phi_{\text{rel}}$  entlang einer in Abbildungsteil (a) rot markierten Strecke gegenüber der Ground-Truth-Phasenverteilung (grüner Funktionsverlauf). Neben der violett-farbenen, gepunkteten Linie kann die Lage der von der betrachteten Strecke geschnittenen Kante dem schwarzen Funktionsverlauf der absoluten Rohphasenfehler  $\epsilon(\phi_{\text{rel}})$  durch signifikant erhöhte Werte entnommen werden.

In Abbildung 4.16 ist der bereits durch Abbildung 4.15 (b) in Form von Rohphasenwerten visualisierte, durch adaptive, lokale Beleuchtungsbestimmung induzierte Fehler  $\epsilon(\phi_{\text{rel}})$ , an einer gewählten Strecke (in Abbildung 4.16 (a) rot) numerisch ausgewertet. Der rote  $\phi_{\text{rel}}$ -Werteverlauf deckt sich weitgehend mit dem grün codierten Ground-Truth-Verlauf, ausgenommen in der Umgebung der von der betrachteten Auswertestrecke geschnittenen Kante – gekennzeichnet durch eine violett gefärbte Punktlinie. Die Rohphasenfehler  $\epsilon(\phi_{\text{rel}})$  sind an dieser Stelle bis zum Faktor 5 stärker ausgeprägt, als an von der Kante entfernteren Bildpositionen.

Begründet aus der Bestimmung von Kantenstrukturen auf Basis sprunghaft veränderlicher Werte auf den Phasenschubkarten  $\Delta\phi_{R_n}^c$ , werden Intensitätssprünge ausschließlich an Objektkanten vermutet und führen zu einer adaptiven Verkleinerung der Bildpunktumgebung. Beleuchtungseinflüsse sekundärer Objekte finden daher keine Beachtung in der Bestimmung der Bildpunktumgebung.

Wie bereits in Abbildung 3.13 (c) visualisiert führt diese Annahme der lokal ausschließlich kleinen Variation der Beleuchtungsparameter in Bereichen starker, durch sekundäre Objekte induzierte Helligkeitsänderungen zu signifikanten Fehlern in der Bestimmung von Beleuchtungsparametern  $a_n^c(x, y)$  und  $b_n^c(x, y)$  und daran anschließend auch in der Rohphasenermittlung. Dies ist in Abbildung 4.17 visualisiert. Wie den durch Pfeile markierten und rot hervorgehobenen Bildbereichen in Abbildungsteil 4.17 (c) entnommen werden kann, sind die Hauptfehler der Feinphasenbestimmung beim Messobjekt Prisma am Übergang zwischen abgeschatteten und unbeeinflussten Objektteilen zu finden. Liegt dieser Übergang auf einer ansonsten planaren Fläche, wie im konkreten Fall bei der mittleren Deckfläche des Prismas, kann mit dem vorgestellten Algorithmus 3.1 eine signifikante Fehlerminimierung bis hin zur -vermeidung erzielt werden.

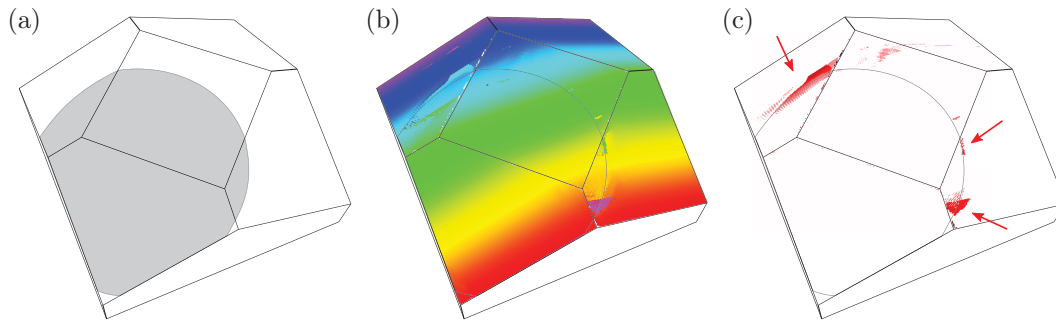


Abbildung 4.17: Durch Schattenwurf sekundärer Objekte (Abschnitt 3.3.3.4) induzierte Fehler.

(a) Bereich des Schattenwurfes, (b) Feinphasenverteilung mit lokaler Beleuchtungsbestimmung und adaptiver Bildpunktumgebung, (c) absolute Differenzen zwischen berechneter Feinphasenkarte und dem Ground-Truth-Datensatz – eine höhere Intensität der Rotfärbung spiegelt einen größeren Fehler wider.

## 4.6 Fehlerquellen der dreidimensionalen Bewegungsdetektion und -kompensation

Das im Kapitel 3 vorgestellte Gesamtverfahren der dreidimensionalen Bewegungsdetektion mit anschließender -kompensation zur dynamischen Objektvermessung besteht aus einer Mehrzahl an Algorithmen, welche einschränkenden Annahmen unterliegen und in Teilen für jeden Bildpunkt  $(x, y)$  Informationen der Umgebung nutzen. Damit ist eine lokale, bildpunktgenaue Bestimmung von Zwischenergebnissen ausgeschlossen, was zu Fehlern in der Gesamtberechnung dreidimensionaler Objektkoordinaten  $O_k$  führt. In den folgenden Abschnitten werden einzelne Algorithmen auf ihren Einfluss approximierter beziehungsweise fehlerbehafteter Zwischenergebnisse auf das Gesamtergebnis hin untersucht.

### 4.6.1 Genauigkeitsanforderungen an grobe 3D-Punktwolken

Sowohl die Bestimmung von Feldern sechsdimensionaler Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$  zwischen aufeinander folgenden 3D-Ergebnissen verschiedener Aufnahmezeitpunkte  $n$ , als auch die Bestimmung bewegungskompensierter Intensitätsbilder  $\overline{I}_n^c$  und lokal differenzierter Phasenschubkarten  $\Delta\phi_{R_n}^c$  basieren auf dreidimensionalen Objektkoordinaten, die Ergebnis der Auswertung von Interferogrammen eines Aufnahmezeitpunktes sind. Für das grundsätzlich in dieser Arbeit verwendete



Systemsetup, bestehend aus zwei Kamerasensoren und einer Projektionseinheit, existieren damit genau zwei Intensitätsbilder  $I_n^{c1}$  und  $I_n^{c2}$  im 8-Bit-Grauwertbereich als Ausgangspunkt der (groben) Objektkoordinatenbestimmung.

Wie bereits in Abschnitt 1.1 beschrieben und in [Lut13] quantitativ gezeigt, verbessert sich bis zu einem Sättigungspunkt die Genauigkeit dreidimensionaler Objektrekonstruktion mit steigender Anzahl verwendeter, paarweise verschiedener Projektionsmuster. Diese Möglichkeit der Nutzung einer Mehrzahl differenzierter Intensitätsverteilungen als temporäre Objekttextur ist für eine 3D-Objektkoordinatenbestimmung aus ausschließlich einem Zeitpunkt außer unter der Anwendung der in Abschnitt 2.2.2 in V5 beschriebenen Vereinigungsmuster und der damit verbundenen Akzeptanz beschriebener, signifikanter Nachteile nicht gegeben. Die geringe Anzahl an Eingabedaten, konkret in Form von genau zwei Interferogrammen im 8-Bit-Grauwertbereich, führt zwangsläufig zu Fehlern bei der Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten, welche unter Variation verschiedener Parameter der Auswertalgorithmik ausführlich in Abschnitt 4.3 visualisiert und diskutiert sind. Im Folgenden wird die Fehlerpropagation oder möglicherweise -kompensation numerisch für eine Sequenzlänge bestehend aus acht Aufnahmezeitpunkten ( $n \in [1, 2, \dots, 8]$ ) dargestellt.

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist das Ground-Truth-Modell des in dieser Arbeit zur synthetischen Bilderzeugung verwendete und in Abbildung 4.2 (c) visualisierte Prisma der Kantenlänge 90 mm. Die dreiecksbasierte Oberflächenrepräsentation ist mithilfe des 3D-Inspektionsprogramms „Geomagic Qualify 12“ entsprechend der in Abschnitt 4.3.1 als Analyseauflösung festgelegten Bildpunktanzahl von  $1.024 \times 1.024$  Pixel und einem Sichtfeld von  $240 \times 170$  mm in eine 3D-Punktwolke überführt und soll im Weiteren mit  $\{O_k\}^{GT}$  bezeichnet sein. Zur Analyse von Fehlereinflüssen auf das finale, bewegungskompensierte 3D-Ergebnis wird diese Ground-Truth-Punktwolke synthetisch mit 3D-Abweichungen versehen. In einer ersten Untersuchung sind die dabei für alle Objektpunkte  $\in \{O_k\}^{GT}$  induzierten 3D-Fehler  $\epsilon^{3D}$  paarweise voneinander unabhängig. Über die betrachtete Messsequenz, bestehend aus acht Aufnahmezeitpunkten, erfolgt eine Bewegung des Messobjektes von 2 mm beziehungsweise 2 Grad zwischen je zwei aufeinander folgenden Aufnahmezeitpunkten. Für die Auswertung wird die rein translatorische Bewegung von der ausschließlichen Rotationsbewegung getrennt betrachtet.

Die in Abbildung 4.18 dargestellten Ergebnisse entsprechen einer Boxplotvisualisierung. Dabei entspricht jeder dargestellte Boxplot der zehnfachen Berechnung von je sieben Experimenten mit einer Bewegung jeweils unterschiedlichen Achsen beziehungsweise Achsenkombinationen folgend: X, XY, XYZ, XZ, Y, YZ und Z. Als Farb- und Strichcodierung ist das auf der folgenden Seite oberhalb der Abbildung 4.18 definierte System verwendet.

Als Eingabe-3D-Standardabweichung  $\sigma^{3D}$  werden die Werte 0  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  und 500  $\mu\text{m}$  verwendet. Dem Experiment ohne 3D-Standardabweichung ( $\sigma^{3D} = 0$ ) lässt sich der grundsätzlich durch das Vorgehen der Bewegungsdetektion mit anschließender -kompensation entstehende Fehler entnehmen. Dieser fällt mit 9  $\mu\text{m}$  für translatorische Bewegungen und 12,5  $\mu\text{m}$  für Rotationen gering aus. Für alle größeren Eingabe-3D-Standardabweichungen steigt die Standardabweichung der 3D-Fehler des Endresultates zunehmend an. Dem Verlauf der Quotienten aus Eingabe- und Sequenz-3D-Standardabweichung – Translation: 3,57 - 4,35 - 4,26 - 4,41 - 4,20; Rotation: 2,50 - 3,08 - 3,17 - 4,08 - 4,74 – lässt sich eine signifikante Verringerung der zufällig verteilten 3D-Fehler über eine Messsequenz um den Faktor 3 bis 5 entnehmen. Dabei fällt die Verbesserung der 3D-Standardabweichung über eine Messsequenz von acht Aufnahmezeitpunkten für Rotationsbewegungen leicht schlechter aus, als für translatorische Objektverschiebungen. Hervorzuheben ist die signifikante Verringerung der *Vollständigkeit V* des 3D-Ergebnisses. Dabei

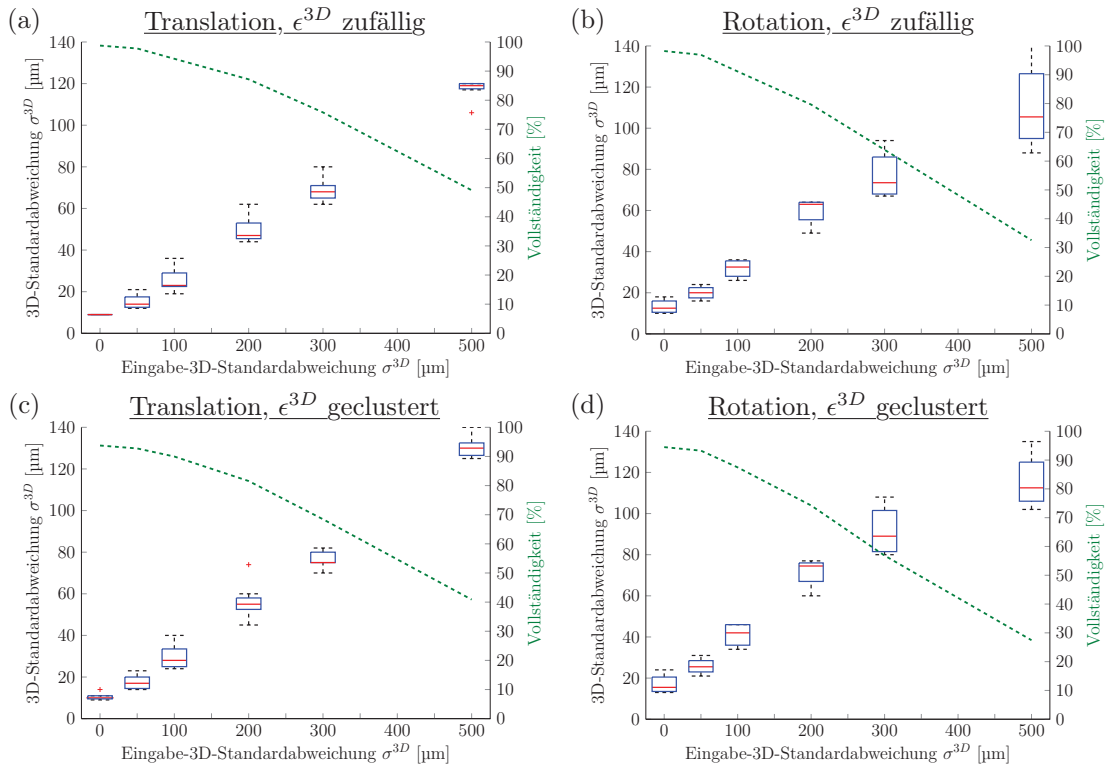
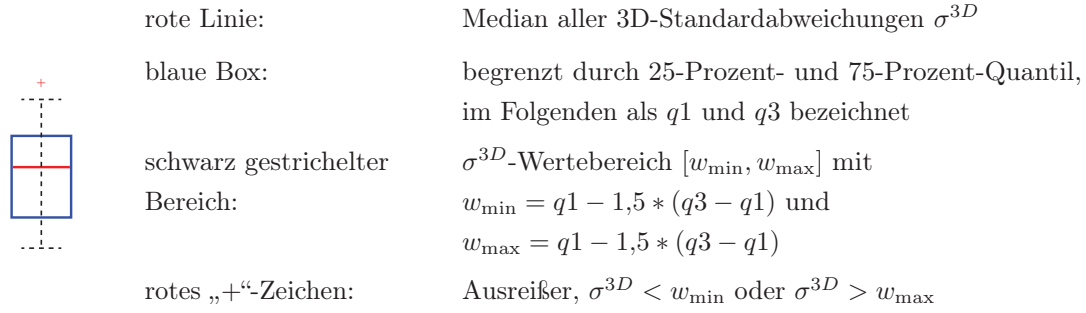


Abbildung 4.18: Propagation von 3D-Standardabweichungen über eine Messsequenz der Länge  $N = 8$ . Dabei entsprechen die Teilbilder folgenden Kombinationen aus Bewegungsform und Fehlerverteilung: (a) Translation mit zufälliger  $\epsilon^{3D}$ -Verteilung, (b) Rotation mit zufälliger  $\epsilon^{3D}$ -Verteilung, (c) Translation mit geclustelter  $\epsilon^{3D}$ -Verteilung, (d) Rotation mit geclustelter  $\epsilon^{3D}$ -Verteilung. Die Darstellung der 3D-Standardabweichungen des jeweiligen Endresultates erfolgt als Boxplot mit der in obiger Übersicht definierten Codierung. Vollständigkeitswerte der je 70 Einzelergebnisse sind gemittelt den grünen Funktionsverläufen visualisiert und jeweils der rechten Diagrammachse zugeordnet.

wird die Vollständigkeit über den Quotienten aus der Anzahl rekonstruierter 3D-Objektkoordinaten, welche einen 3D-Fehler kleiner  $200 \mu\text{m}$  besitzen, und der Anzahl der 3D-Punkte der Ground-Truth-Punktwolke  $\{O_k\}^{\text{GT}}$  definiert. Ein 3D-Resultat mit  $V < 80$  Prozent wird dabei für weitere Auswertungen als zu fehlerbehaftet angesehen, womit sich für diese erste Untersuchung der Bereich von Eingabe-3D-Standardabweichungen auf  $[0, 200] \mu\text{m}$  einschränkt.

Grundsätzlich entspricht die weitgehend zufällige Verteilung von 3D-Fehlern in der Eingabe der realen Fehlerverteilung, die sich, wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, abhängig von Unstetigkeitsstellen des Messobjektes, sowie der Filterdimension und Kamerablickrichtung wellenförmig über das 3D-Ergebnis eines Aufnahmezeitpunktes ergibt. Ein weiterer Einfluss auf die Fehlerverteilung ist durch die 3D-Struktur des zu vermessenden Objektes gegeben, so dass in Bereichen hoher Komplexität gehäuft Fehler zu finden sind. Auf dieser Basis wird eine zweite Untersuchung durchgeführt, bei der die induzierten 3D-Fehler einer geclusterten Verteilung über das Messobjekt entsprechen. Die Anhäufung wird dabei in approximativ runden Bereichen zufälliger Größe in das Ground-Truth-Punktmodell  $\{O_k\}^{\text{GT}}$  induziert. Die erzielten Ergebnisse des aus 3D-Bewegungsdetektion und -kompensation bestehenden Gesamtverfahrens sind den Diagrammen (c) und (d) in Abbildung 4.18 zu entnehmen.

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit zufälliger 3D-Fehlerverteilung in der Eingabe lassen sich äquivalente Verläufe und Trends feststellen. In absoluten Zahlen ist eine leichte Verschlechterung zwischen geclusterten und zufälligen Eingabe-3D-Fehlern augenscheinlich, die sich allerdings ausschließlich im einstelligen Prozentbereich bewegt. Ebenso sinkt die Vollständigkeit der jeweiligen 3D-Resultate mit steigender Eingabe-3D-Standardabweichung von 93,75 auf 40,87 Prozent bei translatorischen Bewegungen, respektive von 94,5 auf 27,45 Prozent bei Rotationen des Objektes während der Messsequenz mit acht Aufnahmezeitpunkten. Auch dies entspricht einer Verschlechterung der Einzelwerte gegenüber der zufälligen Fehlereingabe im einstelligen Prozentbereich. Allerdings wird die empirisch festgelegte Grenze von  $V < 80\%$  bei Rotationsbewegungen bereits bei Eingabe-3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D} > 100\ \mu\text{m}$  erreicht. Zur Verschiebung dieser Schwelle empfiehlt sich eine Verlängerung der Messsequenz, wobei weitere Fehler durch Abweichungen der sechs-dimensionalen Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$  hervorgerufen werden können. Detaillierte Auswertungen hierzu werden im folgenden Abschnitt 4.6.2 gegeben.

Im Allgemeinen wurde mithilfe der zwei präsentierten Untersuchungen, welche sich voneinander in der Verteilung induzierter 3D-Fehler unterscheiden, gezeigt, dass das Gesamtverfahren der 3D-Bewegungskompensation eine Verbesserung des Ergebnisses der dreidimensionalen Objektkoordinatenbestimmung gegenüber Analysen eines einzelnen Aufnahmezeitpunktes ermöglicht.

#### 4.6.2 Fehler in der 6D-Bewegungsschätzung

Die Bewegungsdetektion im dreidimensionalen Raum und damit die Bestimmung sechs-dimensionaler Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$  erfolgt, wie im Abschnitt 3.2.2 erläutert, unter Zuhilfenahme der frei verfügbaren Bibliothek „libicp“. Abschnitt 4.4 zeigt die Genauigkeit dieses Verfahrens auf, welche als gut, aber nicht fehlerfrei beschrieben werden kann. Aus diesem Grund ist im Folgenden der Einfluss von Fehlergrößen bei der 6D-Bewegung auf die 3D-Standardabweichung der durch das Gesamtverfahren der Bewegungskompensation ermittelten 3D-Punktwolke  $\{O_k\}$  untersucht und quantitativ dargestellt. Die Länge der verwendeten Messsequenz beträgt analog zum vorhergehenden Abschnitt  $N = 8$ .

Die Auswertung ist in drei Bewegungsformen des Messobjektes unterteilt:

- translatorische Bewegungen weitgehend orthogonal zur Richtung der  $(1 + \cos)$ -Perioden
- translatorische Bewegungen weitgehend parallel zur Richtung der  $(1 + \cos)$ -Perioden
- Rotationsbewegungen um die Achskombinationen X, XY, XZ, XYZ, Y, YZ, sowie Z (siehe hierzu Koordinatensystem in Abbildung 4.2 (a))

Das Richtungsverhältnis der Bewegung zur Temporärtextur in  $(1 + \cos)$ -Form besitzt bei der Bewegungsbestimmung einen entscheidenden Einfluss, da fehlerbehaftete 6D-Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$  zur Fehlerpropagation bei bewegungskompensierten Intensitätsbildern  $\bar{T}_n^c$ , Phasenschubkarten  $\Delta\phi_{R_n}^c$  und damit auch der lokalen Beleuchtungsbestimmung  $a_n^c$  und  $b_n^c$  führen.

Als Versuchsobjekt wird wiederum der prismatische Körper der Kantenlänge 90 mm verwendet. Für translatorische Bewegungen werden pro Richtung – orthogonal beziehungsweise parallel zur  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung – Bewegungsgrößen in Millimeterschritten von 1 mm bis zu 10 mm zwischen je zwei aufeinander folgenden Aufnahmezeitpunkten genutzt. Rotationsbewegungen erfolgen in 0,5 Grad-Schritten zwischen 0,5 Grad und 5 Grad zwischen je zwei Bildaufnahmen der gleichen Kameraperspektive. Zusätzlich existiert der Faktor zwei aufgrund der Stereokameraanordnung. Die Ergebnisse der damit bestehenden je 20 Messszenarien für die Translationsbewegungen und in Summe 140 Szenarien für Rotationsbewegungen werden für die Auswertung pro Fehlerinduzierung von in Zehn-Prozent-Schritten -50 Prozent bis 50 Prozent in Bezug zur Ground-Truth-Bewegung gemittelt. Zusätzlich werden die Fehlergrößen -5 und 5 Prozent betrachtet. Eine weitere Zusammenfassung erfolgt für betragsmäßig gleiche Fehleranteile, so dass es sich bei der Wertdarstellung innerhalb der Diagramme in Abbildung 4.19 um Mittelwerte aus so vielen Messszenarien handelt, wie sie in folgender Tabelle beschrieben sind:

	synthetischer Bewegungsfehler $\epsilon(\tau^{6D})$						
	0 %	5 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Translation orthogonal zu $(1 + \cos)$ -Perioden	jeweils 40 Messszenarien						
Translation parallel zu $(1 + \cos)$ -Perioden	jeweils 40 Messszenarien						
Rotationsbewegungen	jeweils 280 Messszenarien						

Die teilweise großen Abweichungen in den Feinphasenwerten  $\epsilon(\phi) > 1.0$  ermöglichen keine Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten, weshalb die Ergebnisdarstellung in Abbildung 4.19 auf Phasenfehler  $\epsilon(\phi)$  beschränkt ist. Zur eindeutigen Spezifizierung zu  $(1 + \cos)$ -Perioden ausgerichteter, orthogonaler respektive paralleler Objekttranslation, sind die beiden entsprechenden Bewegungsformen schematisch in Abbildung 4.19 (a) definiert.

Den drei Ergebnisdiagrammen in Abbildung 4.19 ist ein signifikanter Einfluss fehlerbehafteter Bewegungsvektoren zu entnehmen. Bereits eine Abweichung von 10 Prozent führt im Gesamtdurchschnitt zu einem Phasenfehler von 0,51. Ausreißer im positiven Sinn sind dabei Translationsbewegungen approximativ orthogonal zur Richtung der  $(1 + \cos)$ -Perioden mit einem  $\epsilon(\phi)$ -Wert von 0,19. Im weiteren Verlauf ergeben sich sowohl für Rotations-, als auch zur Streifenrichtung orthogonaler Translationsbewegungen lineare Anstiege der absoluten Phasenfehler, während Translationen parallel zu den  $(1 + \cos)$ -Perioden ab einem induzierten Bewegungsvektorfehler von  $\epsilon(\tau^{6D}) = 30$  Prozent in eine Art Sättigung bei  $\epsilon(\phi) \approx 2,1$  gelangen.

Weitgehend vom synthetischen Fehler des Bewegungsvektorfeldes unbeeinflusst verhält sich die Vollständigkeit der berechneten Phasenkarten. Dabei definiert sich die Vollständigkeit aus der Anzahl berechneter, Bildpunkt positionierter Phasenwerte  $\phi(x, y)$  zur Anzahl maximal möglicher Phasenwerte bei  $\epsilon(T^{6D}) = 0$  %.

Für Messobjekte mit komplexer 3D-Struktur liefert die Bestimmung der 6D-Bewegungsvektorfelder aufgrund der vielfachen existenten Sondermerkmale nach Abschnitt 4.4 geringere Abweichungen zur Ground-Truth-Bewegung, als weitgehend planare oder kugelförmige 3D-Strukturen. Damit empfiehlt sich in Verbindung zu den in diesem Abschnitt diskutierten Ergebnissen der

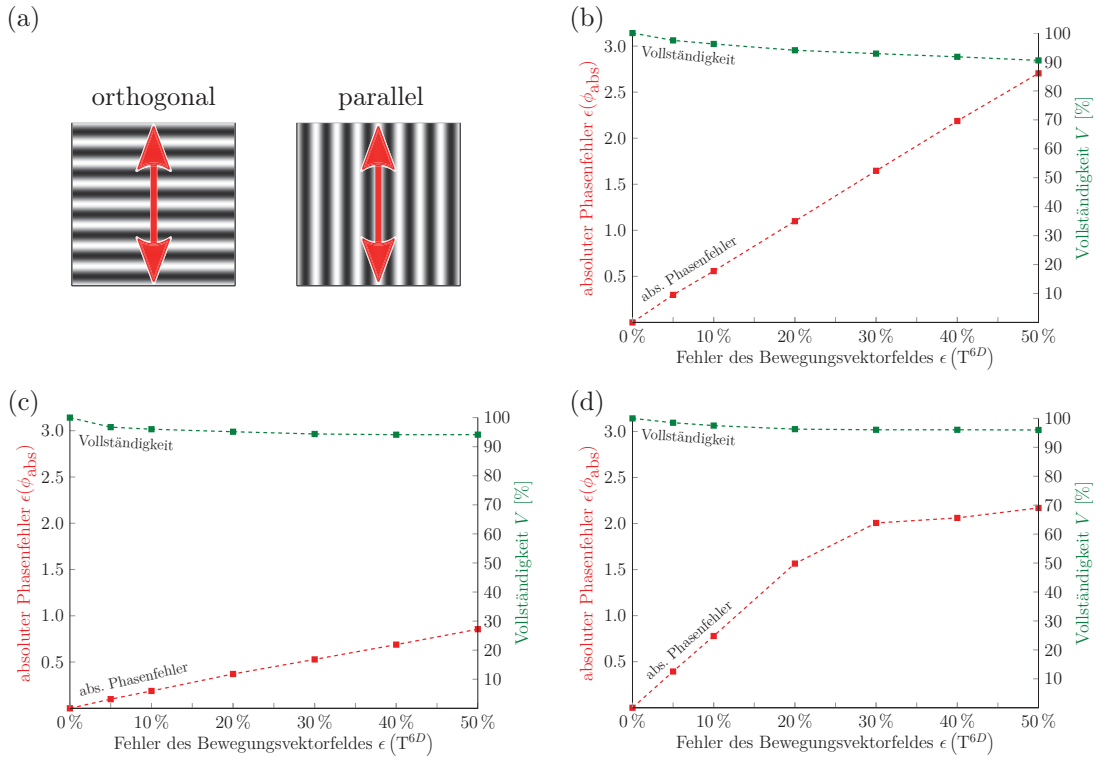


Abbildung 4.19: Einfluss von Fehlern in der Bewegungsschätzung  $\epsilon(\tau^{6D})$  auf die Ermittlung von Feinphasen über eine Messsequenz der Länge  $N = 8$ . (a) Visualisierung der verschiedenen Richtungen von Translationsbewegungen (roter Pfeil) gegenüber der Intensitätsverteilung in  $(1 + \cos)$ -Form. Abweichungen von Feinphasen (rot), sowie Vollständigkeit der jeweils berechneten Feinphasenkarte (grün) für folgende Bewegungsformen und -richtungen: (b) Rotation, (c) Translation orthogonal zu  $(1 + \cos)$ -Perioden, (d) Translation parallel zu  $(1 + \cos)$ -Perioden.

Propagation des Bewegungsvektorfehlers für Objekte mit einfacher 3D-Struktur eine geringe Anzahl paarweise verschiedener Musterstrukturen, für komplexe Messobjekte ist dagegen die Verwendung einer Messsequenz mit  $N \geq 8$  vorteilhaft. Ist eine Beeinflussung der relativen Bewegung  $v_{\text{rel}}$  zwischen 3D-Sensor und Messobjekt möglich, empfiehlt sich die Anwendung approximativ zur projizierten  $(1 + \cos)$ -Streifenrichtung orthogonaler Translation.

#### 4.6.3 Intensitätsrauschen in Aufnahmebildern

Alle bisher betrachteten Versuchsanordnungen basieren auf synthetisch erstelltem, rauschfreien Bildmaterial im 8-Bit-Grauwertbereich. Der Einfluss von sensorinduziertem und beleuchtungsabhängigem Intensitätsrauschen, einem additivem Fehler der Intensitätswerte  $I_n^c$ , wird in diesem Abschnitt untersucht. Grundvoraussetzung sind die mithilfe des Raytracing-Programms „POV-Ray v3.7“ synthetisch erzeugten Intensitätsbilder der Messobjekte Kugel und Prisma mit einer quadratischen Bildauflösung von  $1.024 \times 1.024$  Pixel. Als temporäre Objekttextur ist eine Projektion von 64  $(1 + \cos)$ -Perioden verwendet, was einer Periodenbreite von 16 Pixel auf dem Projektorchip entspricht. Diese Ausgangsdaten sind additiv mit einer zweidimensionalen, zufälligen Normalverteilung an Grauwerten im Bereich  $[-127, 128]$  versehen. Der quadratische Mittelwert

dieser Verteilung ist im Weiteren als *RMS-Rauschlevel* bezeichnet und mit  $\xi_{\text{RMS}}$  symbolisiert. Tabelle 4.6 lassen sich zur anschaulicheren Einordnung die zu jedem RMS-Rauschlevel  $\xi_{\text{RMS}}$  zugehörigen, maximalen Amplituden  $\widehat{\xi_{\text{RMS}}}$  der 2D-Intensitätsverteilung entnehmen.

Tabelle 4.6: Zuordnungstabelle verwendeter RMS-Rauschlevel  $\xi_{\text{RMS}}$  zu maximalen Amplituden der Verteilung  $\widehat{\xi_{\text{RMS}}}$ . Alle Werte sind in Grauwerten ( $\text{GW} \in [-127, 128]$ ) angegeben.

$\xi_{\text{RMS}}$ [GW]	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\widehat{\xi_{\text{RMS}}}$ [GW]	0	$\pm 2,4$	$\pm 5,2$	$\pm 7,3$	$\pm 9,3$	$\pm 13,6$	$\pm 15,0$	$\pm 17,9$
$\xi_{\text{RMS}}$ [GW]	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	
$\widehat{\xi_{\text{RMS}}}$ [GW]	$\pm 20,0$	$\pm 22,3$	$\pm 25,3$	$\pm 27,0$	$\pm 28,8$	$\pm 33,0$	$\pm 35,8$	

Für die zwei Intensitätsbilder  $I_n^{c1}$  und  $I_n^{c2}$  je eines Aufnahmezeitpunktes erfolgte die Addition unterschiedlicher Rauschverteilungen. Dies geschieht zur Vermeidung von Fehlereliminationen durch die Triangulation zwischen absoluten Phasenverwerten. Grundsätzlich ist die Möglichkeit gegeben, fehlerbehaftete Intensitätswerte zu fehlerbehafteten Roh- und Feinphasen auszuwerten, diese Fehler durch die anschließende Triangulation zwischen beiden Bildaufnahmen aber zu eliminieren, wenn die Fehlergröße an korrespondierenden Bildpunkten in den Feinphasenkarten ähnlich ist.

In Abbildung 4.20 ist der Einfluss durch additives Intensitätsrauschen veränderter 2D-Bilder  $I_n^c$  sowohl auf die 3D-Standardabweichung  $\sigma^{3D}$  (eng gestrichelt), als auch die Vollständigkeit (gepunktet) der rekonstruierten 3D-Objektkoordinaten der Messobjekte Kugel und 90 mm-Prisma gegenüber den jeweiligen Ground-Truth-Datensätzen veranschaulicht. Aus der Bewertung werden dabei Objektkoordinaten mit einem 3D-Fehler  $\epsilon^{3D} > 200 \mu\text{m}$  ausgeschlossen. Konkret sind die Ergebnisse der zwei Verfahren zur Auswertung von Interferogrammen gegenübergestellt, die den Ausführungen in Abschnitt 4.3.2 folgend die jeweils besten Resultate für die zwei grundsätzlichen Systemanordnungen – FTP gegenüber SSSA – liefern: Die adaptiv gefensterterte 2D-AWFTP, sowie die 2D-WFT mit fester Fenstergröße und -verschiebung.

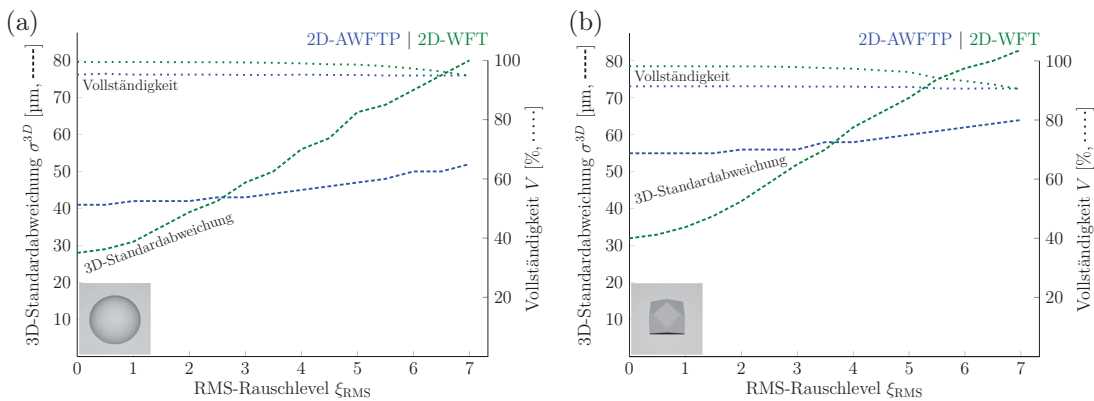


Abbildung 4.20: Einfluss von Intensitätsrauschen auf die 3D-Standardabweichung  $\sigma^{3D}$  (eng gestrichelt) und Vollständigkeit (gepunktet) der triangulationsbasierten Auswertung von Interferogrammen  $I_n$  eines Aufnahmezeitpunktes. Das induzierte Rauschen entspricht einer gaußschen Normalverteilung. Die Auswertung der Messobjekte Halbkugel und Prisma erfolgte mithilfe der 2D-AWFTP (blau) als Referenz, sowie der 2D-WFT (grün) als nach Abschnitt 4.3.2 bestes eigenes Verfahren.



Den gepunkteten Funktionsverläufen, welche die Vollständigkeit der jeweiligen, dreidimensionalen Punktwolke widerspiegeln, ist kein signifikanter Einfluss mit additivem Intensitätsrauschen versehener Interferogramme zu entnehmen. Unabhängig vom verwendeten Messobjekt ist bei Verwendung des 2D-WFT-Verfahrens zur Frequenzauswertung bis einschließlich einem RMS-Rauschlevel von 4,0 eine Vollständigkeit  $V > 97$  Prozent gegeben. Über alle betrachteten  $\xi_{\text{RMS}}$ -Level sinkt dieser Wert nicht unter 90 Prozent. Unter Verwendung des AWFTP-Verfahrens zur zweidimensionalen Frequenzfilterung ergibt sich eine leicht geringere Vollständigkeit von über alle betrachteten Rauschlevel approximativ konstanten  $94,9 \% \leq V \leq 95,2 \%$  für das Messobjekt Halbkugel, sowie  $90,6 \% \leq V \leq 91,4 \%$  für das Messobjekt Prisma.

Eine Differenzierung ergibt sich dem entgegengesetzt bei Betrachtung der erzielten 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$ , in Abbildung 4.20 eng gestrichelt dargestellt. Während bei Anwendung der 2D-AWFTP zwischen dem minimalen und maximal verwendeten Rauschlevel  $\xi_{\text{RMS}} = 0$  und  $\xi_{\text{RMS}} = 7$  ein Anstieg von 26,8 Prozent beim Messobjekt Halbkugel beziehungsweise 16,4 Prozent bei dem prismatischen Körper zu verzeichnen ist, verschlechtert sich die dreidimensionale Punktwolke bei einer 2D-AWFT-Auswertung um 285,7 Prozent respektive 159,4 Prozent. Ursache des größeren Anstiegs der 3D-Standardabweichungen beim Messobjekt Halbkugel gegenüber dem prismatischen Körper ist die sehr schmale Abbildung von  $(1 + \cos)$ -Perioden im von der Kameraansicht abhängig oberen oder unteren sichtbaren Bereich. Diese Bereiche hoher Objektgradienten (Winkel zwischen 3D-Sensorsystem und Oberflächennormale) sind für die Bestimmung präziser 3D-Objektkoordinaten stark fehleranfällig, sowohl für durch Intensitätsrauschen induzierte Einflüsse, als auch die Anzahl und Anordnung im 3D-Sensor verwendeter Kamerasensoren, wie im folgenden Abschnitt im Speziellen betrachtet wird.

Der signifikante Unterschied im Anstieg der 3D-Standardabweichungen mit steigendem RMS-Rauschlevel zwischen den Auswerteverfahren 2D-AWFTP und 2D-WFT ist durch das Design der Bandpass beziehungsweise grundsätzlichen Frequenzfilterung gegeben. Wie in Abschnitt 3.2.1.1 erläutert und in Abbildung 3.2 (b) visualisiert, werden im Rahmen der 2D-AWFTP alle Frequenzanteile der Intensitätsverteilung  $I_n^c$  ungleich des zur Trägerfrequenz  $f_0$  zugehörigen Peaks  $Q_1$  entfernt. Hochfrequente Bildanteile, wie Intensitätsrauschen und im Allgemeinen Intensitätssprünge werden dadurch von nachfolgenden Bearbeitungsschritten ausgeschlossen. Dem bereits diskutierten Nachteil der Entfernung von Objektkanten steht damit der Vorteil der weitgehenden Elimination von Rauscheinflüssen entgegen. Dem steht konträr das Filterdesign der 2D-WFT-Frequenzanalyse gegenüber, bei dem alle Frequenzanteile des Spektralanteils  $C$  mit  $f > f_0 - \epsilon_{\min}(f_0)$  zur weiteren Verarbeitung erhalten bleiben. Dem Erhalt hochfrequenter Objektstrukturen steht damit ein signifikanter und in den eng gestrichelten, grünen Funktionsverläufen in Abbildung 4.20 dargestellter Einfluss von Intensitätsabweichungen gegenüber einer trigonometrischen Verteilung entgegen.

Im Allgemeinen und unter Betrachtung der im Kapitel 5 verwendeten Realdatensätze kann ein RMS-Rauschlevel  $\xi_{\text{RMS}} > 2,5$  ausgeschlossen werden, sodass die 3D-Standardabweichung  $\sigma^{3D}$  unter Verwendung des 2D-WFT-Verfahrens geringer ausfällt, als die bis dahin grundsätzlich schlechter abschneidende 2D-AWFTP. Sollte aus verschiedenen Gründen ein Kamerasensor mit einem grundsätzlichen Rauschlevel  $\xi_{\text{RMS}} \gg 3$  Verwendung finden, empfiehlt sich eine Anpassung des Filterdesigns der 2D-WFT mit Ausschluss hochfrequenter Anteile im Spektralbereich.



#### 4.6.4 Objekteigenschaft: Maximale Oberflächengradienten

Weiteren Einfluss auf die Genauigkeit der Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten besitzt der Winkel zwischen 3D-Sensorsystem und Oberfläche des Messobjektes. Dabei sind sowohl die Blickwinkel der Kameras, als auch die Einstrahlrichtung der Musterprojektion entscheidend. Im Folgenden soll dafür der Begriff des *Oberflächengradienten* verwendet werden, der sich durch den Winkel zwischen den Normalenvektoren des 3D-Sensors und der Objektoberfläche definiert, sowie in Abbildung 4.21 (a) schematisch visualisiert ist. Der Normalenvektor des 3D-Sensors ist ein orthogonaler Strahl zur Triangulationsbasis, also der Verbindungslinie beider Kamerasensorhauptpunkte, in Projektions- und Kamerablickrichtung.

Aufgrund kontinuierlich veränderlicher Objektgradienten  $\gamma_{O_k}$  wird zur Analyse des Parametereinflusses die Halbkugel als Messobjekt verwendet. Die verschiedenen maximalen Objektgradienten werden durch Schnitte der Halbkugel mit einer Ebene in unterschiedlichen Höhen realisiert. Liegt der Schnitt direkt an der Stelle des größten Kugelumfangs, entspricht der sichtbare Bereich exakt einer Halbkugel und damit einem maximalen Oberflächengradienten von 90 Grad. Ein Schnitt am Extrempunkt der Kugel erzeugt einen Oberflächengradienten von 0 Grad – von der Kugel ist ausschließlich ein Punkt zu sehen. Liegt die Schnittebene vom Extrempunkt  $r/2$  mit  $r$  dem Kugelradius entfernt, ergibt sich, wie in Abbildung 4.21 (a) mit dem dunkelblauen Kugelabschnitt veranschaulicht, ein maximaler Oberflächengradient von  $\gamma_{O_k} = 60$  Grad.

Äquivalent zu den vorherigen Untersuchungen werden Bilddaten mit einer Punktzahl von  $1.024 \times 1.024$  verwendet. Die Musterprojektion erfolgt mit 64  $(1 + \cos)$ -Perioden beziehungsweise einer Entsprechung von 16 Pixel pro Periode. Aufgrund nicht signifikanter Einflüsse von Oberflächengradienten im Bereich  $0^\circ \leq \gamma_{O_k} < 45^\circ$  sind in Abbildung 4.21 (b) ausschließlich Ergebnisse für  $\gamma_{O_k} \geq 45^\circ$  dargestellt.

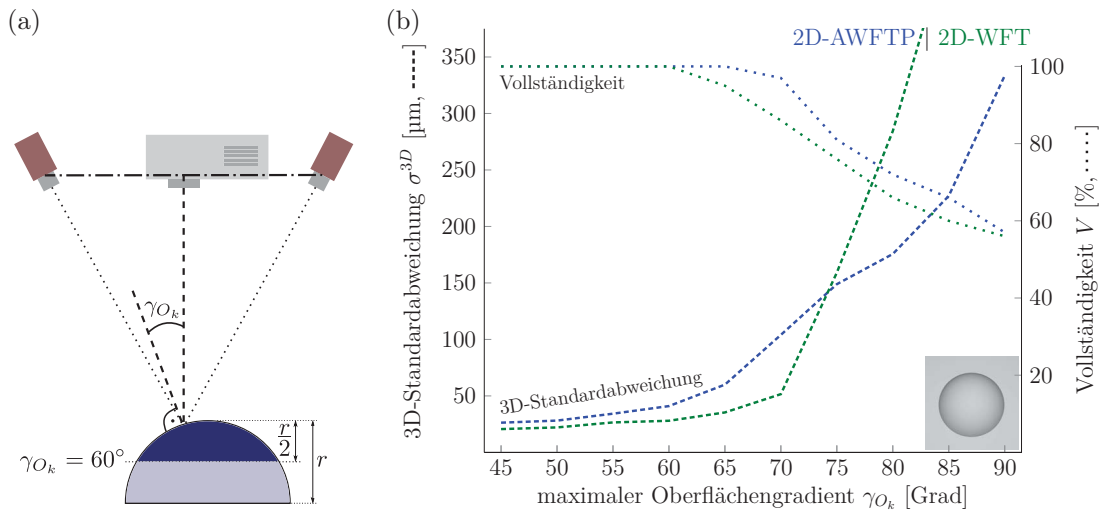


Abbildung 4.21: (a) Visuelle Definition des Oberflächengradienten  $\gamma_{O_k}$ . (b) Einfluss des maximalen Oberflächengradienten  $\max_k\{\gamma_{O_k}\}$  beziehungsweise Winkels zwischen 3D-Sensor und Messobjektoberfläche auf die 3D-Standardabweichung  $\sigma^{3D}$  (eng gestrichelt), sowie Vollständigkeit  $V$  (gepunktet) der triangulationsbasierten Auswertung von Interferogrammen eines Aufnahmezeitpunktes  $I_n$ . Die Auswertung am Messobjekt Halbkugel erfolgt mithilfe der Analyseverfahren 2D-AWFTP (blau) als Referenz und 2D-WFT (grün).

Sowohl die Ergebnisse für die Vollständigkeit als auch die 3D-Standardabweichung unterliegen unabhängig des verwendeten Auswerteverfahrens bei maximalen Oberflächengradienten im Bereich [45, 60] Grad keinen signifikanten Veränderungen. Ab diesem Punkt, bei dem ein Viertel der gesamten Kugeloberfläche für die Kameras sichtbar ist, steigt mit Vergrößerung des maximalen Oberflächengradienten die 3D-Standardabweichung stark an. Des Weiteren ist ein für weitere Verarbeitungsschritte bedeutender Verlust der Vollständigkeit des Rekonstruktionsergebnisses festzustellen.

In absoluten Werten unterscheiden sich die beiden untersuchten Auswerteverfahren 2D-AWFTP und 2D-WFT ab der Schwelle des maximalen Oberflächengradienten  $\gamma_{O_k} > 60^\circ$  wie folgend beschrieben. Während die 3D-Standardabweichung der berechneten, dreidimensionalen Punktwolke  $\{O_k\}$  bei der Frequenzauswertung mithilfe der zweidimensionalen AWFTP direkt ab  $\gamma_{O_k} > 60^\circ$  ansteigt, erhöht sich die 3D-Standardabweichung für das Verfahren mit fester Fensterbreite und -verschiebung 2D-WFT erst ab einem maximalen Oberflächengradienten größer 70 Grad signifikant, dafür aber deutlich stärker als die 2D-AWFTP-Auswertung. Für  $\gamma_{O_k}$ -Werte größer 75 Grad bietet das auf der FTP-Systemanordnung basierte Verfahren bessere Werte als die SSSA-Anordnung. Die Ursache dabei liegt in der Verwendung von zwei Kameras anstatt einer einzigen, womit eine zusätzliche Winkelgröße in Form des halben Triangulationswinkels hinzukommt. Auf einer Kugeloberfläche stehen damit verbreiterten Abbildungen der  $(1 + \cos)$ -Perioden in der einen Ansicht schmale Abbildungen in der anderen Ansicht zur Korrespondenzsuche gegenüber. Dies verschlechtert zum einen signifikant die Genauigkeit des 3D-Resultates und verringert zum anderen deutlich die Vollständigkeit des Ergebnisses, insbesondere in den angesprochenen Randbereichen, bei denen die Periodenabbildung für beide verwendeten Ansichten  $c1$  und  $c2$  größtmöglich verschieden ist.

Für die dreidimensionale Vermessung einer Halbkugel und damit einem maximalen Oberflächengradienten von  $\gamma_{O_k} = 90^\circ$  ergibt sich für beide verwendeten Verfahren zur Frequenzanalyse eine Vollständigkeit von 56 Prozent. Dies entspricht der Rekonstruktion des Kugelbereiches ausgehend von dem 3D-Sensorsystem nächstgelegenen Objektpunkt bis zu einer Höhe von  $r/2$  und damit im Gradientenbereich  $\gamma_{O_k} \in [0^\circ, 60^\circ]$ . Für alle weiteren Bereiche mit  $\gamma_{O_k} > 60^\circ$  werden ausschließlich sehr wenige bis überhaupt keine neuen Objektpunkte berechnet.

#### 4.6.5 Rückprojektion grober 3D-Punktwolken

In Abschnitt 4.1 wurden mit der 3D-Rückprojektion, sowie dem Raytracing zwei Verfahren vorgestellt, die eine Zuordnung beziehungsweise Abbildung zwischen Objektpunkten des dreidimensionalen Raumes und einer zweidimensionalen Bildebene erstellen. Neben numerischen Fehlergrößen der computergestützten Transformation ergeben sich auch verfahrensbedingte Abweichungen, die im Folgenden diskutiert sind.

Das 3D-Rückprojektionsverfahren basiert auf präzisen Koordinaten sichtbarer Objektpunkte  $O_k$  im dreidimensionalen Raum  $\text{KOS}^{\text{Welt}}$ . Abweichungen beim Bestimmungsprozess dieser Koordinaten, zum Beispiel durch Einzelbildauswertung wie in Abschnitt 4.3, werden in dieser Darstellung vernachlässigt. Ausgehend von dieser dreidimensionalen Repräsentation eines jeden Objektpunktes erfolgt mit gegebener Systemkalibrierung die Transformation von  $\text{KOS}^{\text{Welt}}$  in das zweidimensionale Koordinatensystem  $\text{KOS}^c$  einer jeden verwendeten Kamera  $c$ , sowie in die zweidimensionale Projektorebene  $\text{KOS}^p$ . Fehlergrößen der Systemkalibrierung werden konkret in Abschnitt 4.6.6 diskutiert. Ergebnis dieser Koordinatentransformation ist für jede Kamera und die

Projektorebene ein Vektor  $B$  mit zwei Gleitkommaeinträgen; die Präzision hängt damit von der Gleitkommaarithmetik des verwendeten Computersystems ab. Damit lässt sich der Phasenschub  $\Delta\phi_{R_n}$  in Bezug zum Objektpunkt  $O_k$  hinreichend genau ermitteln.

In den weiterverarbeitenden Schritte finden ausschließlich Grau- und Phasenschubwerte von Bildpunkten  $(x, y)$  mit ganzzahligen Koordinatenangaben  $\in \mathbb{N}$  Anwendung. Dies gilt sowohl für die bewegungskompensierten Intensitätsbilder  $\overline{I_n^c}$ , als auch die Phasenschubkarten  $\Delta\phi_{R_n}$ . Für jeden Bildpunkt  $(x, y)^c$  wird also genau ein 8-Bit-Intensitätswert  $\in [0, 255]$  benötigt, für jeden Projektorebenenpunkt  $(x, y)^p$  ist genau ein Phasenschubwert hinreichend. Zur Bereitstellung dieser sind die folgenden zwei Vorgehensweisen zu unterscheiden:

- Rundung der Einträge von  $B$  auf Ganzzahlwerte  $\in \mathbb{N}$  und Verwendung des für jeden Bildbeziehungsweise Projektorebenenpunkt  $(x, y)$  respektive  $(x, y)^p$  zuletzt berechneten Wertes
- Zwischenspeicherung aller ermittelten Zuordnungen  $O_k \mapsto (x, y)$  und  $O_k \mapsto (x, y)^p$  mit nachgelagerter, gewichteter Interpolation aller Werte von  $(x \pm 1, y \pm 1)$  für  $(x, y)$  beziehungsweise  $(x \pm 1, y \pm 1)^p$  für  $(x, y)^p$

Für das erste Vorgehen sind offensichtlich die Fehler zu verzeichnen, dass die Ergebnisse für  $\overline{I_n^c}$  sowie  $\Delta\phi_{R_n}$  stark von der Berechnungsreihenfolge abhängig sind und pro Bildbeziehungsweise Projektorebenenpunkt ausschließlich ein Berechnungswert in der Weiterverarbeitung Anwendung findet. Dies führt insbesondere in Abhängigkeit der Abbildungsbreite verwendeter  $(1 + \cos)$ -Perioden zu signifikanten Abweichungen in den grundlegenden Daten der generalisierten Phasenberechnung. Mithilfe des zweitgenannten Vorgehens können diese Nachteile wiederum auf die Präzision der Gleitkommaarithmetik der verwendeten Recheneinheit reduziert werden.

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, wird mit dem Raytracing-Ansatz der entgegengesetzte Zuordnungsweg gegangen. Ausgangspunkt ist an dieser Stelle jeweils ein Kamerabildbeziehungsweise Projektorebenenpunkt  $(x, y)$  respektive  $(x, y)^p$  mit ganzzahligen Koordinaten  $\in \mathbb{N}$ . Mithilfe der Lichtstrahlverfolgung wird für jeden Ausgangspunkt der Schnittpunkt  $S_\circ$  mit der Oberfläche des rekonstruierten Messobjektes gesucht. Die Wahrscheinlichkeit für eine direkte Übereinstimmung dieses Schnittpunktes mit einem konkret bestimmten Objektpunkt  $O_k$  ist niedrig, so dass zur Ermittlung der Zuordnungen  $(x, y) \mapsto S_\circ$  beziehungsweise  $(x, y)^p \mapsto S_\circ$  zunächst eine dreiecksbasierte Oberflächenrepräsentation des Messobjektes erstellt werden muss oder eine Interpolation zwischen Objektpunkten  $O_k$  innerhalb einer Nachbarschaft des Schnittpunktes stattfinden muss. Diese Interpolation setzt die Planarität der Objektoberfläche zwischen mindestens drei konkreten Objektpunkten  $O_k$  voraus, was im Fall weitmaschiger 3D-Punktwolken zu verstärkten Fehleinflüssen führt.

Damit konnte gezeigt werden, dass sowohl für das 3D-Rückprojektionsverfahren als auch den Raytracing-Ansatz Fehlerquellen hinsichtlich der Weiterverarbeitung erzielter Daten im Rahmen der dreidimensionalen Bewegungskompensation existieren. Die größtmögliche Minimierung dieser Fehler ist durch das zweitgenannte Vorgehen der 3D-Rückprojektion, mithilfe von Zwischenspeichungen der 3D-2D-Zuordnungen mit anschließender, gewichteter Interpolation gegeben, weshalb dieser Ansatz für die weiteren Untersuchungen innerhalb dieses Kapitels und der Experimente mit Realdatensätzen in Kapitel 5 Anwendung findet.

#### 4.6.6 Systemkalibrierung und Bestimmung von 2D-Punktkorrespondenzen

Unabhängig der konkret verwendeten Verfahren zur Zuordnung dreidimensionaler Objektpunkte  $O_k$  oder  $S_\circ$  zu zweidimensionalen Kamerabild- oder Projektorebenenpunkte  $(x, y)$  beziehungsweise

$(x, y)^p$ , sowie dem Vorgehen bei der Punktkorrespondenzsuche zwischen zweidimensionalen Bildebenen, erfolgt die jeweilige Berechnung mithilfe der Systemkalibrierung. Sie stellt durch intrinsische und extrinsische Parameter die Grundlage zum Übergang zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen  $\text{KOS}^{\text{Welt}}$ ,  $\text{KOS}^p$  und  $\text{KOS}^c$  für  $c \in \{c1, c2\}$  bereit.

In Abhängigkeit des verwendeten Verfahrens zur Bestimmung der intrinsischen und extrinsischen Kalibrierparameter weicht dieser Übergang von der Realität signifikant oder ausschließlich im Bereich der Rechengenauigkeit des verwendeten Computersystems ab. Der Einfluss dieser Fehlergrößen ist zwischen Ansätzen der statischen 3D-Objektvermessung und der dynamischen Bewegungskompensation identisch und kann damit für die vergleichende Betrachtung außer Acht gelassen werden.

Der Bereich der zweidimensionalen Punktkorrespondenzbestimmung besitzt einen Parameter, der an dieser Stelle kurz diskutiert werden soll: Die maximale Abweichung von Feinphasenwerten  $\phi_{\text{abs}}$  zwischen zwei betrachteten Feinphasenkarten verschiedener Ansichten  $c1$  und  $c2$  des gleichen Aufnahmezeitpunktes  $n$ . Ziel bei der Korrespondenzbestimmung ist die Lokalisation des zu  $\phi_{\text{abs}}^{c1}(x, y)$  möglichst gleichen Feinphasenwertes  $\phi_{\text{abs}}^{c2}(x', y')$ . Aufgrund gegebener Mehrdeutigkeiten, bedingt durch die ausschließlich eindimensional variiende Intensitätsverteilung  $(1 + \cos)$ , erfolgt diese Lokalisation entlang der für jeden Bildpunkt  $(x, y)^{c1}$  bestimmten Epipolarlinie. In Abhängigkeit der Genauigkeit dieser Epipolarlinie, bedingt durch die Systemkalibrierung und Kameraverzeichnung, liegt der gesuchte Korrespondenzpunkt von der Epipolarlinie mehr oder weniger weit entfernt. Diese maximale Entfernung gilt es geeignet zu parametrisieren, um weitgehend alle möglichen 2D-Punktkorrespondenzen bestimmen zu können, andererseits Fehuzuordnungen für in ausschließlich einem Kamerabild abgebildeten Objektpunkten auszuschließen. Gleiches gilt für die maximal mögliche Abweichung zwischen dem Feinphasenwert  $\phi_{\text{abs}}^{c2}(x', y')$  mit kleinster Differenz zum Referenzwert  $\phi_{\text{abs}}^{c1}(x, y)$ . Beide Schwellwerte hinsichtlich einer als zur korrekten Punktkorrespondenzbestimmung zulässigen Abweichung sind entscheidend für die Vollständigkeit ermittelter 3D-Punktwolken  $\{O_k\}$  und in diesem Zusammenhang auch möglichen 3D-Standardabweichung  $\sigma^{3D}$ .

## 4.7 Vergleich statischer Setups und Matching-Verfahren mit der vorgestellten 3D-Bewegungskompensation

Die Betrachtung verschiedener Parametrisierungen der Auswertung synthetischer Eingabedaten abschließend, werden folgende Verfahren zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten miteinander verglichen:

- VV1: statisches Messsetup mit acht paarweise verschiedenen  $(1 + \cos)$ -Musterstrukturen, sowie einer  $2\pi$ -Phasenverstetigung mithilfe von Gray-Code-Mustern
- VV2: 3D-Datenermittlung mit Eingabedaten ausschließlich eines Aufnahmezeitpunktes unter Anwendung der vorgestellten SSSA-Systemanordnung sowie -auswertung
- VV3: vollautomatisches Zusammensetzen von acht Resultaten der Einzelzeitpunktauswertung (SSSA), das sogenannte Matching-Verfahren
- VV4: dreidimensionale Bewegungsdetektion und -kompensation einer Messsequenzlänge von  $N = 8$  Streifenlichtbildern jeder Kameraansicht

Für die genannten Untersuchungen sind die Eingabedaten in Form von 8-Bit-Streifenlichtbildern wie folgend beschrieben parametrisiert. Als Messobjekte werden die in den Abbildungen 4.2 (b) und (c) visualisierte Halbkugel und der prismatische Körper der Kantenlänge 90 mm genutzt. Die Bildauflösung beträgt wie in Abschnitt 4.3.1 als hinsichtlich der Berechnungskomplexität und gleichzeitig geringsten Ergebnisabweichung vom Ground-Truth-Modell optimal anzusehenden  $1.024 \times 1.024$  Pixel. Als temporäre Objekttextur wird eine trigonometrische Intensitätsverteilung in  $(1 + \cos)$ -Form mit 64 Perioden verwendet, was einer Periodenbreite von 16 Pixel auf der Projektorebene entspricht. Für eine realitätsnahe Simulation der Qualität von Eingabedaten ist ein zufälliges, gaußverteiltes Rauschen der Größenordnung  $\overline{\xi_{\text{RMS}}} = \pm 15,0$  Grauwerten, das heißt ein RMS-Rauschlevel von  $\xi_{\text{RMS}} = 3,0$  Grauwerten auf die ansonsten artefaktfreien Synthetikbilder addiert. Die Relativbewegung zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten  $n$  und  $n - 1$  beträgt für die Vergleichsverfahren VV2, VV3 und VV4 gleichzeitig  $(R_{v_{\text{rel}}}^X, R_{v_{\text{rel}}}^Y, R_{v_{\text{rel}}}^Z) = (2^\circ, 2^\circ, 2^\circ)$  und  $(t_{v_{\text{rel}}}^X, t_{v_{\text{rel}}}^Y, t_{v_{\text{rel}}}^Z) = (2 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 2 \text{ mm})$ . Das Vergleichsverfahren VV1 besitzt dem entgegengesetzt als statische Referenz eine Relativbewegung von  $v_{\text{rel}} = 0$ .

Die statische Auswertung (VV1) erfolgt unter Zuhilfenahme der Gleichungen (1.2) und (4.4) zur Ermittlung der für eine dreidimensionale Objektrekonstruktion mit Streifenlichtprojektion grundlegenden Rohphasenkarten  $\phi_{\text{rel}}$  je Kameraansicht  $c$ .

$$\phi_{\text{rel}} = \arctan \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} (I_2 + I_4 - I_8 - I_6) + I_3 - I_7}{\frac{1}{\sqrt{2}} (I_6 + I_4 - I_8 - I_2) + I_5 - I_1} \quad (4.4)$$

Die  $2\pi$ -Verstetigung und damit der Übergang von  $\phi_{\text{rel}}^c$  zu eindimensional global eindeutigen Feinphasen  $\phi_{\text{abs}}^c$  erfolgt unter Auswertung zusätzlich projizierter sieben Gray-Code-Muster, deren Binarisierung mithilfe je eines Hell- und Dunkelbildes durchgeführt wird. Auf eine zweite, orthogonal zur ersten ausgerichtete Projektionsrichtung wird durch Anwendung des Epipolaransatzes, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, verzichtet.

Der VV2-Ansatz zur Auswertung von Eingabedaten je eines Aufnahmezeitpunktes  $n$  verwendet das in Abschnitt 4.3.2 als für diese Anwendung bestgeeignete 2D-WFT-Verfahren mit fensterbasierter Frequenzanalyse bei einer Fenstergröße von Bildausdehnung/8 = 128 Pixel und einer sukzessiven Fensterverschiebung von Fenstergröße/8 = 16 Pixel.

Die Bestimmung genau einer dreidimensionalen Punktwolke  $\{O_k\}$  als Ergebnis einer dynamischen Messsequenz der Länge  $N = 8$  erfolgt für das Vergleichsverfahren VV3 mithilfe des 3D-Inspektionsprogramms „Geomagic Qualify 12“. Hierzu werden die acht 3D-Punktwolken aus der jeweiligen Analyse eines Aufnahmezeitpunktes  $n$  als Ausgangsdaten verwendet und durch Anwendung der vollautomatischen Ausrichtung „3D-Best-Fit“ im gemeinsamen Koordinatensystem KOS<sup>Welt</sup> zueinander in Verbindung gesetzt. Zur Quantifizierung der 3D-Standardabweichung  $\sigma(\epsilon(\{O_k\}^{\text{Best-Fit}}))$  wird dieses Gemeinschaftsergebnis  $\{O_k\}^{\text{Best-Fit}}$  mit dem jeweiligen Ground-Truth-Modell in Form einer dreiecksbasierten Oberflächenrepräsentation verglichen.

Das Vorgehen für den im Fokus stehenden VV4-Ansatz der Bewegungsdetektion mit anschließender Bewegungskompensation im dreidimensionalen Raum wird den Ausführungen der Abschnitte 3.2 und 3.3 entsprechend durchgeführt.

Den Ergebnissen in Tabelle 4.7 lassen sich folgende Fakten ableiten. Mithilfe der statischen 3D-Vermessung und der dabei verwendeten Mustersequenz der Länge  $N = 8$  lassen sich unabhängig der Komplexität der Objektoberfläche sehr gute Ergebnisse mit einer 3D-Standardabweichung von 5  $\mu\text{m}$  erzielen. Trotz induziertem Intensitätsrauschen bestehen ausschließlich an den Objektübergängen zum Szenenhintergrund beziehungsweise der Grundebene Abweichungen zwischen



Tabelle 4.7: Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten  $O_k$  eines Messobjektes: Statisches Messsetup mit  $N = 8$ , Einzelzeitpunkt-auswertung unter Verwendung der SSSA-Systemanordnung, vollautomatisches Zusammensetzen von acht Resultaten aus Einzelzeitpunkten und 3D-Bewegungskompensation über eine Sequenzlänge von  $N = 8$ .

	Halbkugel	Prisma
VV1: statisches Messsetup (Epipolargeometrie)	5 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
VV2: Auswertung Einzelzeitpunkt (SSSA)	47 $\mu\text{m}$	52 $\mu\text{m}$
VV3: vollautomatisches Zusammensetzen	44 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
VV4: 3D-Bewegungskompensation	18 $\mu\text{m}$	24 $\mu\text{m}$

der berechneten 3D-Punktwolke und dem jeweiligen Ground-Truth-Modell. Alle weiteren Objektbereiche können mit 3D-Fehlern  $\epsilon^{3D} < 1 \mu\text{m}$  als artefaktfrei rekonstruiert betrachtet werden.

Die durch Auswertung jeweils eines einzelnen Aufnahmezeitpunktes mit SSSA-Systemanordnung erzielten Ergebnisse bestätigen die Resultate vorangegangener Untersuchungen. Dabei ist festzustellen, dass die jeweils konkrete Verteilung des Intensitätsrauschens signifikanten Einfluss auf die Verteilung der 3D-Fehler besitzt. Über das gesamte Messobjekt betrachtet ergibt für alle verwendeten Eingabebildpaare ein identisches Ergebnis bezüglich der 3D-Standardabweichung. Somit kann der Gesamtansatz als robust und deterministisch eingeordnet werden.

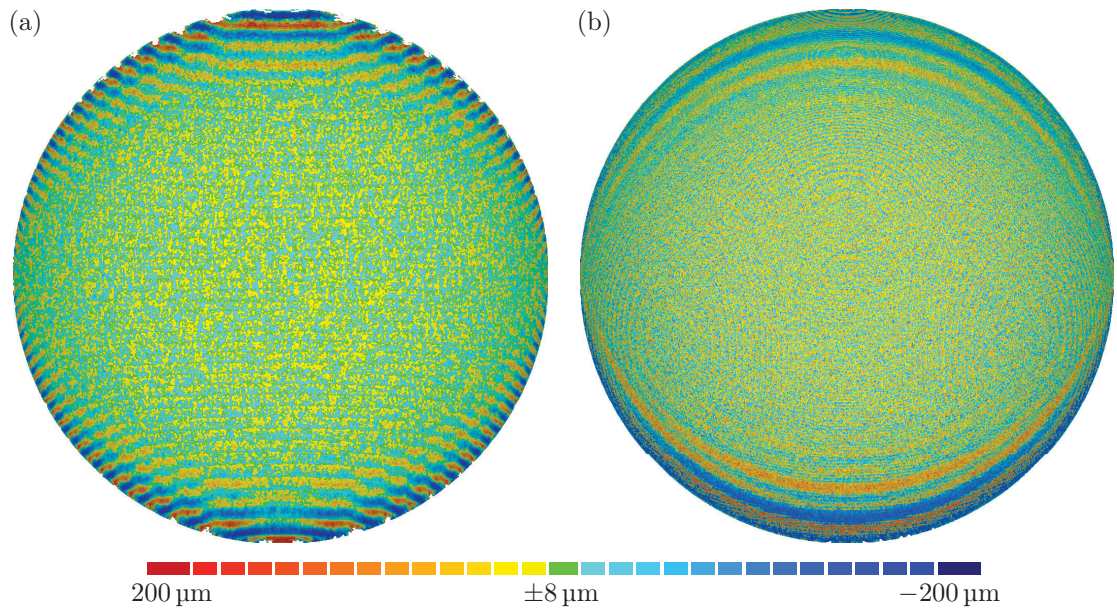


Abbildung 4.22: 3D-Fehlerverteilungen des Messobjektes Halbkugel bei Anwendung (a) der Auswertung von Bilddaten eines Einzelzeitpunktes mithilfe der SSSA-Systemanordnung (VV2) – konkret Zeitpunkt  $n = 8$  –, sowie (b) des vollautomatischen Zusammensetzens der Einzelzeitpunktauswertungen durch Verwendung des 3D-Inspektionsprogramms „Geomagic Qualify 12“ (VV3).

Eine beispielhafte 3D-Fehlerverteilung für das Messobjekt Halbkugel ist in Abbildung 4.22 (a) visualisiert. Dem entgegengesetzt zeigt Abbildung 4.22 (b) die Verteilung an 3D-Fehlern für das Vergleichsverfahren VV3, dem vollautomatischen Zusammensetzen von Einzelzeitpunktergebnissen auf. Zu erkennen ist eine weitgehend stochastische Fehlerverteilung mit Ausnahme der oberen und unteren Randbereiche der Halbkugel, wo wellenartig Häufungen zu finden sind. Die Ursache für diese Häufungen ist in der Krümmung der Oberfläche in Bezug zum 3D-Sensor begründet, wobei die Anordnung der zwei verwendeten Kameras zu starker Stauchung einerseits und starker Dehnung der Periodenbreite in der anderen Kamera und damit zu verstärkten Artefakten gleicher Position in den Einzelzeitpunktergebnissen führt. In Summe ist mit Anwendung des vollautomatischen Zusammensetzens mehrerer Ergebnisse von Einzelzeitpunkten eine geringe Verbesserung der 3D-Standardabweichungen von approximativ 5 Prozent festzustellen.

Die Ergebnisse des mit 3D-Bewegungskompensation bezeichneten VV4-Ansatzes führen gegenüber der ausschließlichen Auswertung von Einzelzeitpunkten mit SSSA-Systemanordnung zu Verringerungen der 3D-Standardabweichung von 61 Prozent beim Messobjekt Halbkugel, sowie 54 Prozent für das verwendete 90 mm Prisma. Ein Vorteil für diese signifikanten Verbesserungen liegt in der weitgehend zufälligen Verteilung von 3D-Fehlern in den Einzelzeitpunktergebnissen  $\{O_{k,n}\}$ , sowie einer jeweiligen Vollständigkeit  $V > 95$  Prozent. Dies fördert, insbesondere bei Verwendung einer Sequenzlänge von  $N = 8$  und damit einem signifikant überbestimmten Gleichungssystem zur Ermittlung von Rohphasen  $\phi_{\text{rel}}$  (siehe Gleichung (3.18)) den Einfluss korrekt ermittelter, dreidimensionaler Objektkoordinaten eines Aufnahmezeitpunktes gegenüber fehlerbehafteten Teilergebnissen.

Der im Gegensatz zu den anderen drei Vergleichsverfahren VV1, VV2 und VV3 existierende, größere Ergebnisunterschied zwischen den zwei betrachteten Messobjekten ergibt sich aus dem Vorhandensein der Vielzahl von Kantenstrukturen im Messobjekt Prisma, welche die Bestimmung von Beleuchtungsparametern und damit auch Rohphasenwerte, wie in Abschnitt 4.5.3 dargestellt, gegenüber der stetigen Kugeloberfläche negativ beeinflussen. Ein signifikanter Einfluss lässt sich daraus aber nicht ableiten.

Die insbesondere in diesem Abschnitt aufgezeigten Resultate, aber auch Ergebnisse unter anderem der Einzelzeitpunktauswertung werden im folgenden Kapitel 5 anhand von Realdaten verifiziert und durch zusätzliche Messobjekte in ihrer Robustheit untersucht.





Was wir Ergebnisse nennen, ist nur der Anfang.

*(Ralph Waldo Emerson)*

## Kapitel 5

### Experimente mit Realdaten zur 3D-Bewegungskompensation

**F**ür Verifikation der in Kapitel 4 vorgestellten und diskutierten Simulationsansätze sowie deren Ergebnissen werden Messungen mithilfe eines etablierten Systems zur dreidimensionalen Objektvermessung durchgeführt. Die Realdatensätze werden dabei durch einen Tischdigitalisierer namens „hiScanp“ erzeugt und jeweilige Referenzergebnisse bestimmt.

#### 5.1 Tischdigitalisierer „hiScanp“: Systemaufbau und Messmöglichkeiten

Das Messsystem „hiScanp“ ermöglicht präzise Rotationsbewegungen des Messobjektes in Bezug zum 3D-Sensor, bestehend aus zwei Kameras und einem Projektionssystem. Abbildung 5.1 (a) zeigt das Messsystem mit geöffneter Fronttür, welche zur Elimination von Umgebungsbeleuchtung und damit der Realisierung bestmöglicher Ergebnisse während der Messung geschlossen ist. In systemspezifischer Entfernung zum 3D-Sensor ist das Messobjekt „geometrische Formen“ positioniert, welches in Abbildung 5.1 (b) alleinstehend mit Gray-Code-Temporärtextur visualisiert ist.

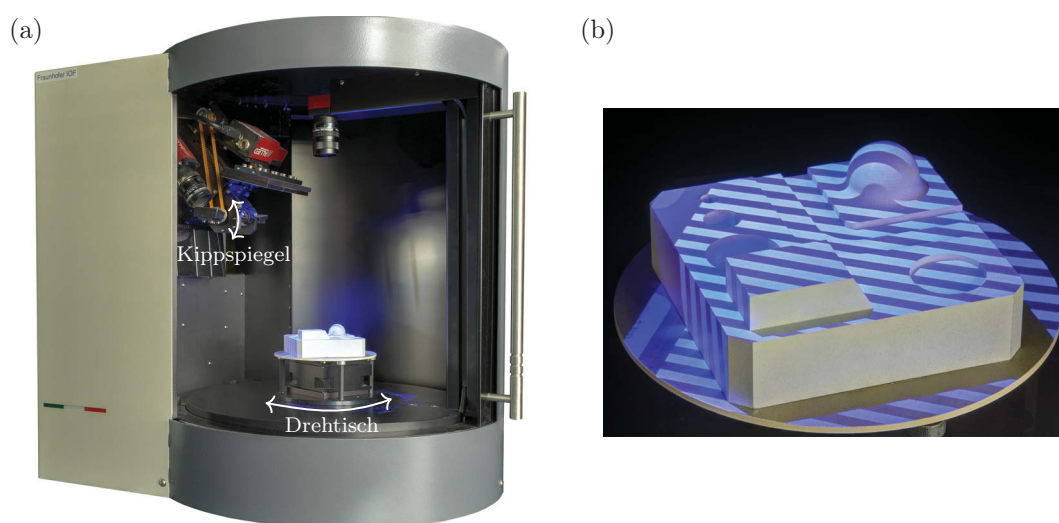


Abbildung 5.1: (a) Tischdigitalisierer „hiScanp“ zur dreidimensionalen Objektvermessung von Objekten mit maximalem Durchmesser der Grundfläche von 120 mm. (b) Das Messobjekt „geometrische Formen“ mit aktiver Gray-Code-Temporärtextur.

Das Gesamtsystem „hiScanr“ besteht aus einem 3D-Sensor mit zwei Firewire 400-Kameras des Typs „Marlin F-145B2“ der Firma Allied Vision Technologies [All14], sowie einem LCoS-Projektionssystem der Firma HoloEye mit einer Beleuchtung im blauen, für die Kameras sensitivsten Spektralfarbbereich [HOL14b]. Eine dritte, in Abbildung 5.1 (a) oben sichtbare und zum Messobjekt statische Kamera dient der Ansichtenverknüpfung bei statischen Mehransichtsmessungen [Not06]. Deren Daten werden zur Messauswertung nicht weiter verwendet. Die Relativbewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor ist durch zwei verschiedene Herangehensweisen realisierbar. Zum einen befindet sich das Messobjekt auf einem Drehtisch gelagert, dessen Motorsteuerung eine Präzision kleiner 0,1 Grad ermöglicht. Des Weiteren erfolgt mithilfe des in der Abbildung 5.1 (a) orangefarbenen Zahnriemens die Neigung kleiner Spiegel, welche die Abbildung des Messobjektes in den Kamerabildebeneen in der Art und Weise variieren, dass visuell eine Verkipfung des Messobjektes ermöglicht wird. Softwaregesteuert erfolgt die Projektion variierender Temporär-muster in Form binärer Gray-Code-Streifen wie in Abbildung 5.1 (b) beispielhaft am Messobjekt „geometrische Formen“ gezeigt, sowie durch 8-Bit-Intensitätsverteilungen in  $(1 + \cos)$ -Form mit 64 Perioden pro Muster. Weitere Systemparameter sind der Tabelle 5.1 zu entnehmen. Für eine ausführliche Systembeschreibung inklusive der statischen Messmethodik wird auf die Erläuterungen von Notni et al. [Not06] verwiesen.

Tabelle 5.1: System- und Komponentenparameter des 3D-Tischdigitalisierers „hiScanr“.

<b>Projektionssystem</b> <b>(HoloEye LCoS LC-R720) [HOL14b]:</b>		<b>Flächenkameras</b> <b>(AVT Marlin F-145B2) [All14]:</b>	
Bildpunktanzahl	$1.024 \times 720$ Pixel	Bildpunktanzahl	$1.392 \times 1.040$ Pixel
Bildpunktgröße	20,00 $\mu\text{m}$	Bildpunktgröße	4,65 $\mu\text{m}$
Brennweite	47,90 mm	Brennweite	17,75 mm
Bildwechselfrequenz	180 Bilder/s	Bildwechselfrequenz	10 Bilder/s
<b>Systemsetup:</b>			
Sichtfeld	$130 \times 100$ mm <sup>2</sup>	Triangulationswinkel	28 Grad

Das 3D-Messsystem zeichnet sich neben der präzisen Bewegungssteuerung um zwei Rotationsachsen auch unter anderem durch verhältnismäßig lange Belichtungszeiten bei guter Szenenbeleuchtung bedingt durch ein geringes Intensitätsrauschen aus. Bei Einordnung in die Zuordnungstabelle der RMS-Rauschlevel in Tabelle 4.6 ergibt sich ein Niveau von  $\xi_{\text{RMS}} \leq 2,0$ .

## 5.2 3D-Ergebnisse mit statischem Messsetup

Als Referenz für die in Abschnitt 5.4 dargestellten Ergebnisse mit einer jeweiligen Datengrundlage genau eines Aufnahmezeitpunkte, sowie den in Abschnitt 5.6 präsentierten Resultaten der dreidimensionalen Bewegungsdetektion und -kompensation, werden an dieser Stelle dreidimensionale Objektrekonstruktionen mit statischer und quasi-statischer Messsituation vorgestellt. Die Bestimmung dieser 3D-Datensätze erfolgt jeweils auf der in Abschnitt 1.1 definierten „vollständigen Mustersequenz“ bestehend aus 48 Einzelbildern je Kameraansicht. Für die Zeitspanne der Musterprojektion und simultanen Bildaufnahme  $T_{\text{Seq}}$  liegt zwischen 3D-Sensor, bestehend aus zwei Flächenkameras und dem LCoS-Projektionssystem, und dem jeweiligen, makroskopischen Messobjekt eine Relativbewegung von  $v_{\text{rel}} = 0$  vor. Als globaler Phasenschub zwischen je zwei

aufeinander folgenden Aufnahmezeitpunkten  $n$  wird über die vollständige Sequenz mit 16  $(1 + \cos)$ -Mustern pro Projektionsrichtung hinweg ein konstanter Wert von  $\Delta\phi_{R_n} = 22,5$  Grad verwendet. Die Bestimmung der Rohphasenkarten  $\phi_{\text{rel}}$  erfolgt auf der 16-Phasenschritt-Gleichung von Kreis [Kre96], die anschließende  $2\pi$ -Verstetigung zum Erhalt der Feinphasenkarten  $\phi_{\text{abs}}$  auf Basis der sieben Muster umfassenden Gray-Code-Sequenz. Für einen geeigneteren Vergleich zu den Ergebnissen nachfolgender Auswertungen von Einzelzeitpunkten und 3D-Bewegungskompensationen wird auf die Informationen der zweiten Projektionsrichtung verzichtet und die globale Eindeutigkeit korrespondierender Punkte zwischen den zwei Kamerasensoren durch Anwendung der Epipolargeometrie bereitgestellt.

Zur Erhöhung der Vollständigkeit der rekonstruierten 3D-Punktwolken wird eine zweite Herangehensweise verwendet, welche auf einer quasi-statischen Objektvermessung basiert. Hierbei werden im Halbraum oberhalb des Messobjektgrundfläche durch Rotationen sowohl des Drehtisches als auch der Kippspiegel zwölf verschiedene Relativpositionen von Messobjekt in Bezug zum 3D-Sensor angefahren. Die Musterprojektion und Bildaufnahme pro Relativposition erfolgt wiederum statisch, so dass im Gesamtverbund von einer quasi-statischen Messsituation gesprochen werden kann. Die Vereinigung der zwölf dreidimensionalen Einzelergebnisse im Weltkoordinatensystem  $\text{KOS}^{\text{Welt}}$  wird mithilfe einer präzisen Systemkalibrierung und der dritten, sich im Gesamtsystem befindenden Kamera durchgeführt [Not06].

Zur Einschätzung der Genauigkeit der zwei beschriebenen Herangehensweisen in Verbindung mit dem Gesamtsystem „hiScanpi“ sind nachfolgend 3D-Standardabweichungen auf einer Prüfebene, zwei verschieden großen Kugeln und einem prismatischen Körper der Grundkörperkantenlänge von 90 mm bestimmt. Die Bestimmung des jeweiligen Medianwertes  $\tilde{\sigma}$  aus zwölf Einzelmessungen in Tabelle 5.2 erfolgt nach folgendem Zusammenhang (5.1):

$$\tilde{\sigma}(\epsilon^{3D}(\{O_k\})) = \frac{1}{2} \cdot (\sigma(\epsilon^{3D}(\{O_{k,6}\})) + \sigma(\epsilon^{3D}(\{O_{k,7}\}))) \quad (5.1)$$

Tabelle 5.2: 3D-Standardabweichungen verschiedener Messobjekte (Abbildung 5.2 (a)-(c), (f)) am „hiScanpi“-System unter Verwendung einer Mustersequenz bestehend aus sieben Gray-Code-Bildern und 16  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen. Die Resultate spiegeln zwölf Einzelmessungen verschiedener Objektansichten wider; das Gesamtergebnis entspricht der Vereinigung aller zwölf Einzelmessungen.

	Prüfebene	kleine Kugel (30 mm)	große Kugel (60 mm)	Prisma (90 mm)
Median	7,3 $\mu\text{m}$	2,5 $\mu\text{m}$	3,3 $\mu\text{m}$	4,3 $\mu\text{m}$
Quartile	[6,0; 8,7] $\mu\text{m}$	[2,3; 2,6] $\mu\text{m}$	[3,1; 3,4] $\mu\text{m}$	[3,4; 4,8] $\mu\text{m}$
Maxima	[5,8; 9,0] $\mu\text{m}$	[2,1; 2,8] $\mu\text{m}$	[2,9; 3,7] $\mu\text{m}$	[3,2; 6,3] $\mu\text{m}$
Gesamtergebnis	6,9 $\mu\text{m}$	2,5 $\mu\text{m}$	3,1 $\mu\text{m}$	4,0 $\mu\text{m}$

Die Ergebnisse in Tabelle 5.2, insbesondere die des jeweiligen Gesamtergebnisses, weisen mit [2,5  $\mu\text{m}$ ; 6,9  $\mu\text{m}$ ] sehr geringe 3D-Standardabweichungen gegenüber Ground-Truth-Datensätzen auf. Darauf basierend und aufgrund für die in den folgenden Experimenten genutzten Messobjekte teilweise fehlenden Ground-Truth-Daten, werden die jeweiligen Gesamtergebnisse als Referenz zur Bestimmung von 3D-Fehlern und 3D-Standardabweichungen der Einzelzeitpunktauswertung und 3D-Bewegungskompensation herangezogen.

### 5.3 Systemsetups für Messen in Bewegung

Den durch das Sichtfeld des „hiScanpi“-Systems gegebenen Beschränkungen maximaler Abmessungen folgend werden für die in den Abschnitten 5.4 bis 5.6 ausgewerteten und diskutierten Experimente die sechs in Abbildung 5.2 fotografisch visualisierten Messobjekte aus Stahl verwendet, deren Oberfläche gegen Reflektionen und Spiegelungen, sowie zur allgemein besseren Messbarkeit mithilfe von „Airbrush Hansa pro-color 60023 weiß“ [Har14] deckend besprüht sind.

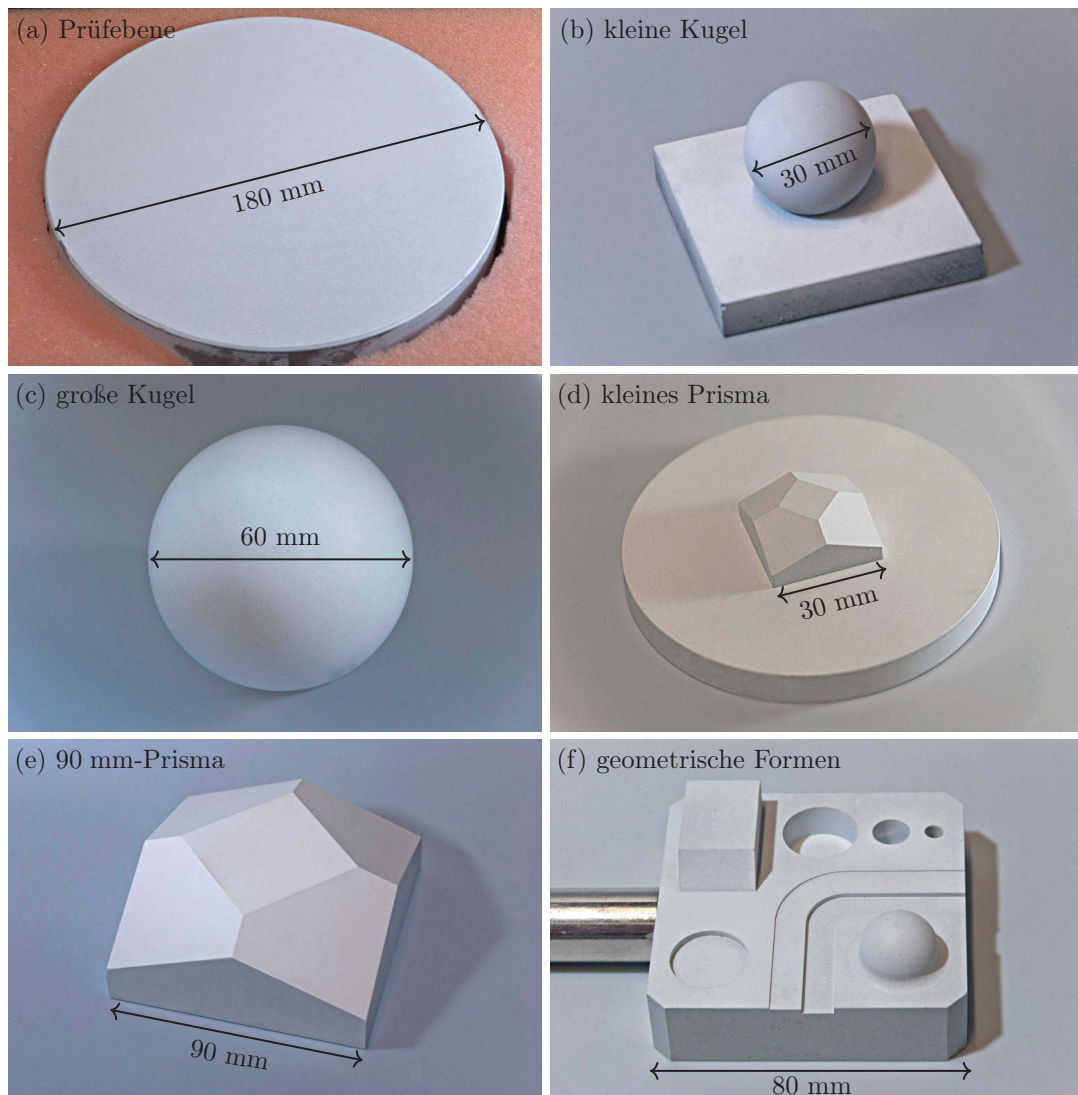


Abbildung 5.2: Zur Auswertung von Einzelaufnahmezeitpunkten sowie zur 3D-Bewegungskompensation verwendete Messobjekte in der Reihenfolge steigender Komplexität: (a) Prüfebene, (b) kleine Kugel mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Grundebene, (c) große Kugel mit einem Durchmesser von 60 mm, (d) kleines Prisma mit einer Grundkantenlänge von 30 mm auf einer Grundebene, (e) 90 mm Prisma, (f) Messobjekt „geometrische Formen“.

Relativbewegungen zwischen 3D-Sensor und dem jeweiligen Messobjekt erfolgen während der Zeitspanne von Musterprojektion und simultaner Bildaufnahme  $T_{\text{Seq}}$  ausschließlich in Form von Rotationen. Dabei wird ein quasi-statischer Ansatz verwendet, bei dem systembedingt ausschließlich

zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten  $n$  eine Bewegung stattfindet. Während der Belichtungszeit einer Bildaufnahme befinden sich das Gesamtsystem inklusive dem makroskopischen Messobjekt in einem statischen Zustand. Die Ermittlung des Einflusses von Bewegungsunschärfe, wie in Abschnitt 3.4.1 auf synthetischer Datenbasis untersucht, ist daher nicht möglich.

Jede Messsequenz Seq besteht grundsätzlich aus  $N = 16$  einzelnen Messpositionen mit jeweiliger  $(1 + \cos)$ -Musterprojektion und einem induzierten Phasenschub von  $\Delta\phi_{R_n} = 22,5$  Grad. Dies ermöglicht neben der Auswertung der vollen Sequenzlänge ( $N = 16$ ) zusätzlich die Auswertung verkürzter Messsequenzen der Länge  $N = 8$  und  $N = 4$ . Für die kürzeste Sequenz mit  $N = 4$  werden die Intensitätsbilder der Aufnahmezeitpunkte  $n = (1, 5, 9, 13)$  als Datengrundlage verwendet, womit die Annahmen eines konstanten Phasenschubs  $\Delta\phi_{R_n} = 90$  Grad zwischen je zwei Aufnahmezeitpunkten, sowie der Gesamtphasenschub von  $\Delta\phi_R^{\text{Seq}} = 360$  Grad über die betrachtete Messsequenz Seq beibehalten werden können. Für  $N = 8$  gelten entsprechend  $n = (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15)$  und  $\Delta\phi_{R_n} = 45$  Grad.

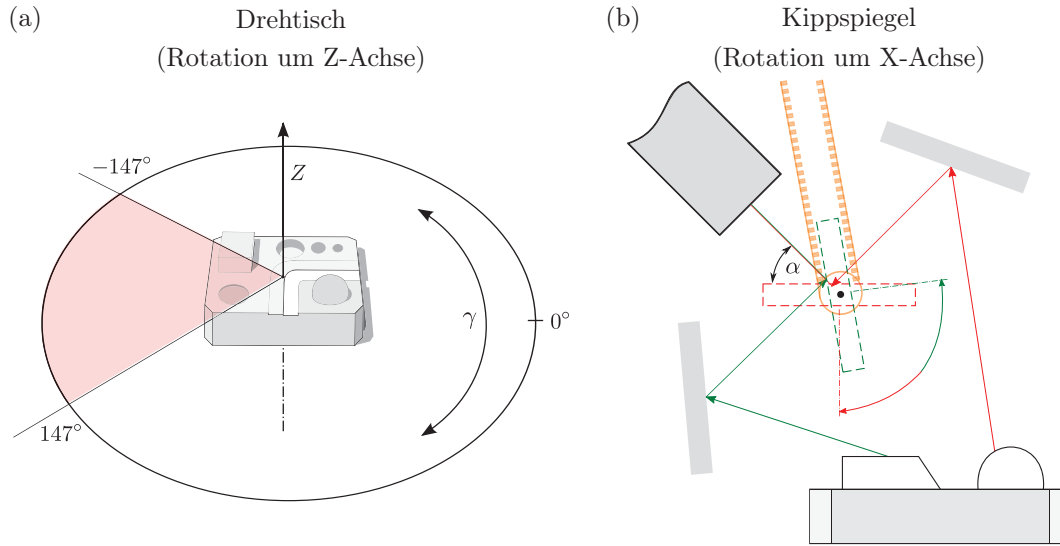


Abbildung 5.3: Bewegungsräume des 3D-Messsystems „hiScanp“: (a) Drehtisch zur Rotation um die Z-Achse mit der 3D-Sensor bedingten Einschränkung des Kreissegments zwischen  $-147$  Grad und  $147$  Grad bei einem Wertebereich des Vollkreises von  $[-180^\circ, 180^\circ]$ ; (b) Kippspiegel zur X-Achsen-Rotation im Bereich  $[-50^\circ, 50^\circ]$  entsprechend grüne Stellung und rote Stellung.

Zur Bestimmung des Einflusses der Bewegungsgeschwindigkeit  $v_{\text{rel}}$  während einer Messsequenz Seq auf die Möglichkeiten und Grenzen der dreidimensionalen Bewegungsdetektion mit anschließender -kompensation, werden Datensätze mit folgenden Relativbewegungen zwischen je zwei Aufnahmezeitpunkten  $n$  zur Auswertung verwendet:

- Rotation um die Z-Achse (Realisierung verschiedener Ansichten):

$$\gamma_{n,n+1} = 1^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ \text{ und } 12^\circ$$

Damit erfolgen um die  $\gamma_{\text{abs}} = 0^\circ$ -Position symmetrische Gesamtbewegungen während  $T_{\text{Seq}}$  von  $\gamma_{\text{Seq}} = 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$  und  $180^\circ$ .

- Rotation um die X-Achse (Realisierung verschiedener Einstrahlwinkel):

$$\alpha_{n,n+1} = -1^\circ, -2^\circ \text{ und } -3^\circ$$

Beginnend bei  $\alpha_{\text{abs}} = 50^\circ$  wird ein minimaler Winkel von  $\alpha_{\text{abs}} = 5^\circ$  erreicht.



Für die jeweiligen Intensitätsbilder eines Aufnahmezeitpunktes erfolgt die SSSA-Auswertung gemäß der in Abschnitt 3.2.1.6 beschriebenen, zweidimensionalen WFT-Analyse im Vergleich zu 3D-Resultaten einer pro Messposition vollständigen Mustersequenz, bestehend aus sieben Gray-Code-Bildern und 16  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilungen als Ground-Truth.

## 5.4 Auswertung von Einzelaufnahmezeitpunkten

Dieser Abschnitt zeigt die Resultate von Einzelaufnahmezeitpunkten an den in Abbildung 5.2 veranschaulichten Messobjekten auf. Dabei ist sowohl für jede der 16 Messpositionen innerhalb einer Mustersequenz eine dreidimensionale Objektrekonstruktion ermittelt, als auch für jede Richtung und Geschwindigkeit der relativen Objektrotation. Die Werte in Tabelle 5.3 spiegeln entsprechend den Ausführungen im vorangegangenen Abschnitt 5.3 daher die Auswertung von 160 Einzelmessungen pro Messobjekt wider. Hierbei ist, gerade in den Extrempositionen einer Mustersequenz, nicht für jeden Zeitpunkt die Sichtbarkeit der vollständigen Objektoberfläche gegeben. Die jeweilige 3D-Standardabweichung ergibt sich dadurch jeweils in Bezug zum 3D-Ergebnis der aktuell betrachteten Messposition unter Verwendung einer vollständigen Mustersequenz in dreiecksbasierter Oberflächendarstellung.

Tabelle 5.3: 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  von Messobjekten unterschiedlicher 3D-Struktur und Größe bei Einzelzeitpunktauswertungen mithilfe einer 2D-WFT-Frequenzanalyse von Bildaufnahmen des „hiScan“-Systems. Als Referenz- beziehungsweise Ground-Truth-Daten sind dreidimensionale Messergebnisse einer pro Messposition vollständigen Mustersequenz in dreiecksbasierter Oberflächendarstellung verwendet.

Messobjekt	3D-Standardabweichung		
	Median	Minimalwert	Maximalwert
Prüfebene	48 $\mu\text{m}$	46 $\mu\text{m}$	49 $\mu\text{m}$
kleine Kugel	46 $\mu\text{m}$	39 $\mu\text{m}$	51 $\mu\text{m}$
große Kugel	32 $\mu\text{m}$	31 $\mu\text{m}$	32 $\mu\text{m}$
kleines Prisma	49 $\mu\text{m}$	43 $\mu\text{m}$	54 $\mu\text{m}$
90 mm-Prisma	36 $\mu\text{m}$	34 $\mu\text{m}$	39 $\mu\text{m}$
geometrische Formen	67 $\mu\text{m}$	61 $\mu\text{m}$	75 $\mu\text{m}$

Den Ergebnissen in Tabelle 5.3 lassen sich teilweise signifikante Schwankungen zwischen Minimal- und Maximalwert entnehmen. Dies betrifft insbesondere die beiden in Bezug zur Größe des Sichtfeldes kleinen Messobjekte „kleine Kugel“ und „kleines Prisma“. Bei der kleinen Kugel ist eine sehr starke Abhängigkeit der 3D-Standardabweichung von der Blickrichtung beziehungsweise Messposition festzustellen. So ergeben Messpositionen, welche eher von oben auf die Konstellation aus Kugel und darunterliegender Ebene gerichtet sind, bessere Ergebnisse, das heißt geringere 3D-Standardabweichungen. Ursache dessen ist die jeweils sichtbare, maximale Oberflächenkrümmung in Bezug zum 3D-Sensor. Ähnliches gilt für das Messobjekt „kleines Prisma“, wobei hier der Bereich größter 3D-Fehler an den ausschließlich teilweise sichtbaren Objektkanten liegt. Sind zum Beispiel weitgehend eine Seitenfläche und eine Hälfte der Deckflächen für beide Kameras sichtbar, so ergeben sich an dieser Stelle geringere 3D-Standardabweichungen.



Für das Messobjekt „geometrische Formen“, welches ebenfalls eine größere Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert der bestimmten 3D-Standardabweichungen besitzt, ergeben sich die Abweichungen insbesondere durch die Kombination aus komplexer Objektoberfläche und Lage der  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung. So führen dunkle Bereiche der  $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung an Übergangspositionen der Halbkugel und der drei Bohrungen zur jeweils umgebenden Ebene zu größeren 3D-Fehlern. Diesen signifikanten Fehlerunterschieden steht keine Fehlerminimierung auf den weitgehend planaren Oberflächenbereichen entgegen, so dass sie über das Gesamtobjekt betrachtet zu größeren 3D-Standardabweichungen führen.

Aufgrund gehäuft auftretender Probleme bei der korrekten  $2\pi$ -Phasenverstetigung der jeweiligen Grundebene von kleiner Kugel und kleinem Prisma, sind in Tabelle 5.3 ausschließlich die Werte der jeweiligen 3D-Standardabweichung für das eigentliche Messobjekt, die Kugel beziehungsweise das Prisma aufgeführt. Ebenso verhält es sich mit der Halbkugel und den drei Bohrungen im Messobjekt „geometrische Formen“, wie im Folgenden näher dargestellt. Vollständige Ergebnisse auf Basis der markerfreien, in Abschnitt 3.2.1.5 vorgestellten Phasenverstetigung werden in Abschnitt 5.5 gegeben.

Im Folgenden werden zunächst die Resultate des komplexen Messobjektes „geometrische Formen“ im Detail betrachtet. Für diese Betrachtungen ist das Messobjekt anhand des für die betrachtete Messposition  $\alpha = 50^\circ, \gamma = -90^\circ$  verwendeten Ground-Truth-Datensatzes in vier Bereiche untergliedert, wie sie in Abbildung 5.4 (a) farblich voneinander verschieden und durchnummeriert visualisiert sind.

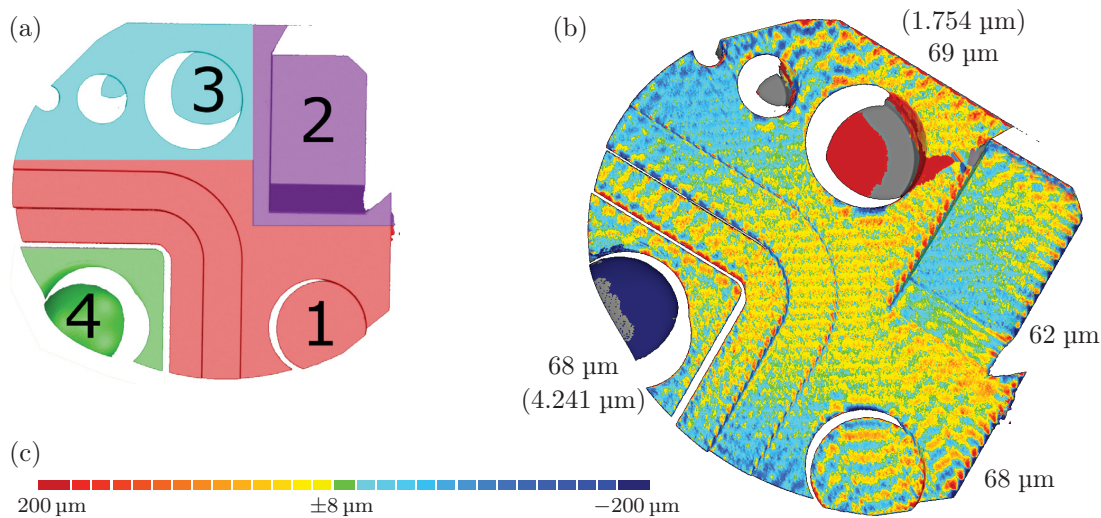


Abbildung 5.4: (a) Untergliederung des Messobjektes „geometrische Formen“ in vier Bereiche mit spezieller Charakteristik. (b) Verteilung der 3D-Fehler  $\epsilon^{3D}$  der Auswertung eines Einzelaufnahmezeitpunktes gegenüber dem Ground-Truth-Modell. Die Farbcodierung entspricht der in (c) dargestellten Unterteilung von  $-200 \mu\text{m} < \epsilon^{3D} < 200 \mu\text{m}$ . Annotierte Werte sind 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  des jeweiligen Objektbereiches, wobei die Klammerwerte der vollständigen Auswertung inklusive fehlerhaft verstetigter Objektteile entsprechen.

Abbildung 5.4 (b) zeigt die Verteilung der 3D-Fehler zwischen der Auswertung des einzelnen Aufnahmezeitpunktes mit der Datengrundlage von zwei Ansichten (SSSA-Prinzip) gegenüber einer aus sieben Gray-Code-Mustern und 16 Intensitätsverteilungen in  $(1 + \cos)$ -Form beste-

henden Sequenzanalyse als Ground-Truth-Modell (grau). Dabei insbesondere auffallend sind die großen Abweichungen im Bereich der Halbkugel unten links, sowie der größten Bohrung oben in dunkelblauer respektive durchgehend roter Färbung. Die Ursache dieser mit 4,4 mm für die Bohrung und 6,8 mm für die Halbkugel stark abweichenden Objektbereiche liegt in einer falschen  $2\pi$ -Verstetigung beim Übergang von Roh- in Feinphasen  $\phi_{\text{rel}} \mapsto \phi_{\text{abs}}$ . Beide Objektbereiche besitzen in Relativbezug zum 3D-Sensor maximale Gradienten größer 60 Grad, womit den Auswertungen in Abschnitt 4.6.4 entsprechend verstärkt 3D-Fehler sowie eine verringerte Vollständigkeit der dreidimensionalen Oberflächenrekonstruktion festzustellen ist. Damit ist für den global, entlang nicht-kontinuierlicher Pfade  $2\pi$ -verstetigenden Algorithmus von Herráez et al. [Her02] keine zuverlässige Überführung der Rohphasenwerte  $\phi_{\text{rel}}$  in eindimensional global eindeutige Feinphasen  $\phi_{\text{abs}}$  möglich und führt im anschließenden Vorgang der Triangulation, den Feinphasen in Kombination mit der Epipolargeometrie entsprechender, korrespondierender Punkte zu fehlerhaften 3D-Koordinaten von Objektpunkten.

Dem entgegengesetzt erfolgt die Bestimmung von 3D-Koordinaten für Oberflächenpunkte des Quaders aufgrund der Rampe zur Grundfläche im in Abbildung 5.4 (a) mit „2“ gekennzeichneten Bereich B2 mit einer Genauigkeit von  $\sigma^{B2}(\epsilon(\{O_k\})) \leq 62 \mu\text{m}$ . Ebenso wird der große, weitgehend planare Bereich der Grundebene mit maximalen Höhengsprüngen von 1,5 mm vollständig mit einer 3D-Standardabweichung  $\sigma^{B1}(\epsilon(\{O_k\})) \leq 68 \mu\text{m}$  rekonstruiert. Werden die Extremabweichungen von den Bohrungen und der Halbkugel aus der jeweiligen Bereichsbewertung ausgeschlossen, werden auch 3D-Standardabweichungen von 69  $\mu\text{m}$  für den Bereich B3 sowie 68  $\mu\text{m}$  für B4 erzielt.

Der subjektive Eindruck der 3D-Fehlerverteilung in Abbildung 5.4 (b) deutet auf eine Verzeichnung der Eingangsbilddaten hin. Eine Verzeichnungsschätzung im zugrundeliegenden Kalibrierprozess des Gesamtsystems konnte eine Minimierung dieses Effektes ermöglichen, aber wie der türkis zu gelb und wieder türkis übergehenden Fehlerverteilung entnommen werden kann, nicht vollständig kompensiert ist. Da die Bestimmung des Ground-Truth-Datensatzes mit der gleichen Verzeichnungskorrektur erfolgte, liegt ein verstärkter Einfluss bei der Auswertung von Einzelaufnahmezeitpunkten nah, kann an dieser Stelle aber nicht quantifiziert werden.

## 5.5 Phasenverstetigung durch Bildsegmentvergleiche

Im vorangegangenen Abschnitt 5.4 wurden für einen Teil der Messobjekte Fehler in der  $2\pi$ -Phasenverstetigung aufgezeigt. Diese basieren auf der Existenz mehrerer Objekte in der Messszene, deren Höhenunterschiede größer der Abbildung einer  $(1 + \cos)$ -Periodenbreite sind und bei der Projektion in die zweidimensionalen Kamerabildebene nicht eindeutig aufgelöst werden können. Ist diese Uneindeutigkeit an keiner Verbindungsstelle der Objekte aufgelöst, erfolgt unter Zuhilfenahme des Verstetigungsalgorithmus von Herráez et al. [Her02] eine fehlerhafte Bestimmung der absoluten Phasenwerte  $\phi_{\text{abs}}$ . Dies ist für die Messobjekte „kleine Kugel“ und „kleines Prisma“ für die Szenenbestandteile „Kugel“ beziehungsweise „Prisma“ mit der jeweiligen Grundebene, als auch die „geometrischen Formen“ in den Bereichen Halbkugel und Bohrungen gegeben. Ausschließlich für das kleine Prisma ist blickwinkelabhängig eine korrekte  $2\pi$ -Phasenverstetigung mithilfe einer teilweise sichtbaren Seitenfläche möglich.

Abbildung 5.5 zeigt mit dem Vorgehen aus Abschnitt 3.2.1.5 farbcodiert die Segmentierungsergebnisse der Messobjekte „kleine Kugel“ und „kleines Prisma“. Hierbei ist in der Bildsegmentierung der kleinen Kugel ein hellgrün markierter Ring auffällig, der bei Messobjekten kleineren Ausmaßes systembedingt für eine zuverlässigere Selbstkalibrierung der Messszene hinzugefügt wird. Die

Segmentgrenzen verlaufen bedingt durch die temporäre  $(1 + \cos)$ -Musterprojektion nicht geradlinig. Die Genauigkeit ist, wie den Ergebnissen in den Abbildungen 5.5 und 5.6 entnommen werden kann, für eine korrekte Zuordnung von Bildsegmenten zwischen den jeweils zwei Ansichten eines Aufnahmezeitpunktes, sowie zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten ausreichend. Die in Abschnitt 5.4 beschriebenen Fehler bei der Ermittlung eindimensional global eindeutiger Phasenwerte  $\phi_{\text{abs}}$  und damit 3D-Objektkoordinaten  $O_k$  mit einem 3D-Fehler gegenüber Ground-Truth-Daten von  $\epsilon^{3D} > 1 \text{ mm}$  können für diese Objektkomplexität aufgelöst werden.

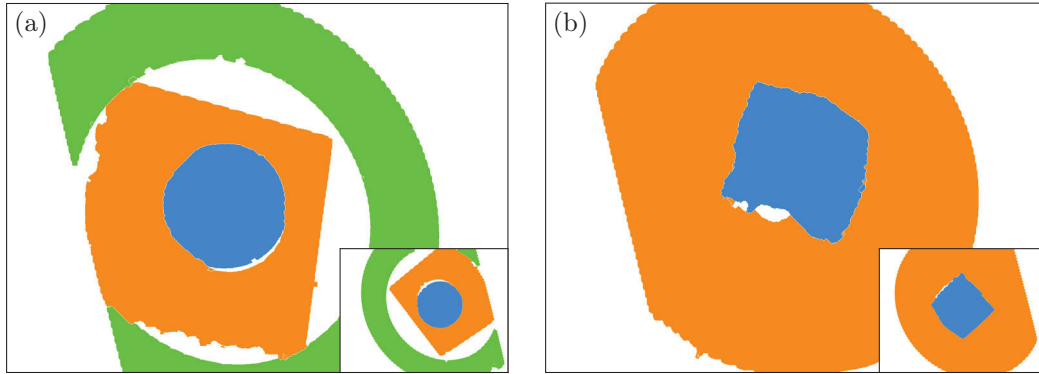


Abbildung 5.5: Farbcodierte Bildsegmentierung auf Datenbasis von Grauwert-Interferogrammen eines Aufnahmezeitpunktes  $n$  des 3D-Messsystems „hiScanr“. Die großen Bilder zeigen die Ansichten der als solches definierten Kamera 1 für das Messobjekt (a) kleine Kugel und (b) kleines Prisma. Das jeweils unten rechts eingeklinkte Bild zeigt die Kameraansicht  $c2$ .

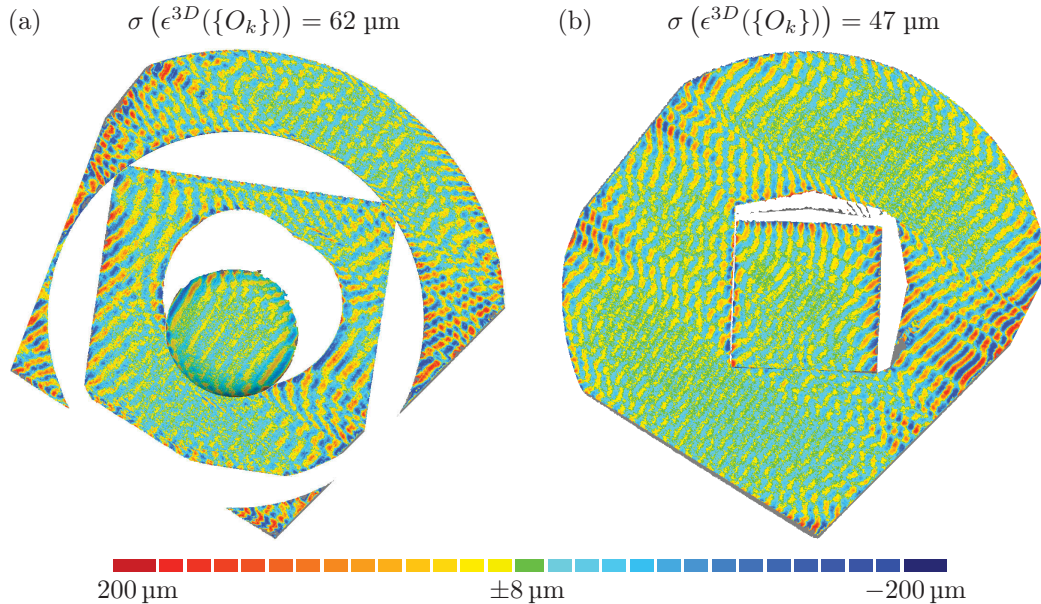


Abbildung 5.6: 3D-Fehlerverteilungen für die „hiScanr“-Messobjekte (a) kleine Kugel und (b) kleines Prisma bei Stereo-Single-Shot-Auswertung und unter Verwendung der in Abbildung 5.5 visualisierten Segmentkarten zur  $2\pi$ -Phasenverstetigung aus [Mül14]. Grau markierte Bereiche entsprechen 3D-Daten der jeweiligen Ground-Truth-Oberflächendarstellung, für welche keine dreidimensionalen Objektkoordinaten mithilfe der Einzelzeitpunktauswertung bestimmt werden konnten.

Eine signifikant höhere Objektkomplexität besitzt das Messobjekt „geometrische Formen“, wobei alle Segmente direkt aneinander angrenzen, es keine Schattenbereiche zur besseren Trennbarkeit gibt. Durch Anwendung des in Abschnitt 3.2.1.5 vorgestellten Algorithmus zur Objekt- beziehungsweise Bildsegmentierung einer Aufnahme mit temporärer Streifentextur in  $(1 + \cos)$ -Form lässt sich unter anderem eine Unterteilung wie in Abbildung 5.7 (b) dargestellt vornehmen. Abhängig von der Blickrichtung des 3D-Sensors auf das Messobjekt werden insbesondere bei den drei Bohrungen verschiedene Segmente bestimmt. Eine korrekte Detektion und Abgrenzung der dritten, kleinsten Bohrung erfolgt aufgrund ihres Durchmesser-Tiefe-Verhältnisses in Zusammenhang mit den verschiedenen Blickwinkeln der beiden verwendeten Kameras zu keinem Aufnahmezeitpunkt.

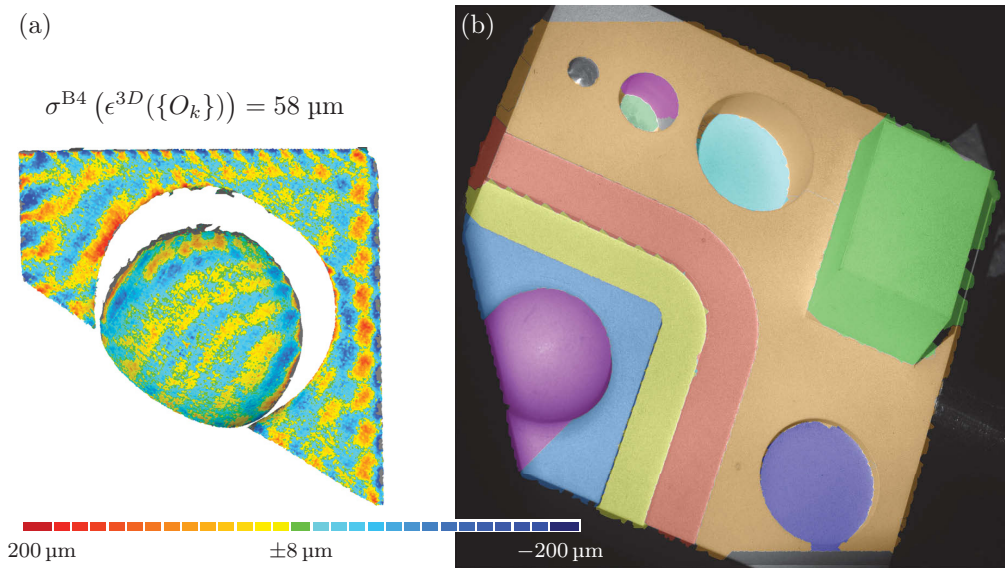


Abbildung 5.7: (a) 3D-Fehlerverteilung des Bereiches B4 der „geometrischen Formen“ bei korrekter  $2\pi$ -Phasenverstetigung der Halbkugel. (b) Farbcodierte Segmentierung des Gesamtobjektes als überlagerte Darstellung des Objekthellbildes aus [Mül14]. Zur vereinfachten Unterscheidbarkeit einzelner Segmente ist die Farbzahl der Codierung minimiert, wobei die Halbkugel und die Seitenfläche der zweiten Bohrung trotz ähnlicher Farbcodierung nicht das gleiche Segment widerspiegeln.

Ein offensichtlicher Fehler erfolgt bei der Segmentierung der Halbkugel, dessen Übergang zur Grundebene an einer Stelle im Zuge der Verlinkung von Segmentkantenzüge gerade zum Außenrand verbunden wird. Dieser Fehler ist in beiden Kameraansichten der in Abbildung 5.7 (b) dargestellten Aufnahme position vorhanden und ergibt deshalb in der konkreten Sensorpositionierung keinen negativen Einfluss auf die  $2\pi$ -Phasenverstetigung sowie die anschließende 3D-Koordinatenbestimmung. Wie dem nebenstehenden Abbildungsteil (a) entnommen werden kann, führt die Bildsegmentierung für die Halbkugel zu einer korrekten Phasenverstetigung und anschließenden Objektkoordinatenbestimmung mit 3D-Fehlern deutlich unter  $\pm 100 \mu\text{m}$ . Insgesamt wird für den nach der in Abbildung 5.4 (a) gegebenen Untergliederung des Messobjektes „geometrische Formen“ für den Bereich B4 eine 3D-Standardabweichung von  $58 \mu\text{m}$  erzielt. Diese als korrekt anzusehende Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten für den Bereich B4 erfolgt bei Betrachtung aller 160 Aufnahme positionen zu 83,1 Prozent. Insbesondere bei Blickrichtungen des gesamten 3D-Sensors approximativ senkrecht auf das Messobjekt erfolgt durch unterschiedliche Schattenausprägung für die zwei Kameraansichten eine leicht verschiedene



Segmentierung, die zu Verstetigungsfehlern der Rohphasen von  $\pm 2\pi$  führt und damit eine korrekte 3D-Koordinatenbestimmung verhindert. Diese Einflussnahme geringer Änderungen der Segmentgrenzen auf das  $2\pi$ -Verstetigungsergebnis lässt sich ausschließlich durch Abänderung der 3D-Sensoranordnung verringern, so wie sie in Abschnitt 3.2.1.5 beschrieben und in Abschnitt 4.3.3 an synthetischen Bilddaten gezeigt wurde.

Für die drei Bohrungen des Messobjektes „geometrische Formen“ erfolgt trotz Optimierung des Vorganges der  $2\pi$ -Phasenverstetigung weiterhin eine falsche 3D-Objektkoordinatenbestimmung. Die Ursache dessen liegt insbesondere für die größte der drei Bohrungen nicht in einer falschen Segmentierung, sondern vielmehr dem Zusammenhang von Bohrlochtiefe und Triangulationswinkel zwischen den beiden verwendeten Kameras von  $\gamma = 28$  Grad. So wird der jeweils sichtbare Bereich der Bodenfläche des Bohrloches in 95 Prozent der betrachteten Aufnahmepositionen korrekt in beiden Kameraansichten segmentiert. Die Überlagerung dieser zwei Segmente schlägt aber zumeist fehl, da sich der sichtbare Bodenflächenbereich zwischen den Kameraansichten einer Aufnahmepositionen zu sehr unterscheidet. Im Gegensatz zu den Ausführungen im Bereich der Halbkugel, ermöglicht eine approximativ senkrechte Blickrichtung des 3D-Sensors in diesem Fall eine verbesserte Segmentüberlagerung und führt zu korrekten  $2\pi$ -Phasenverstetigungen. Dies ist bei den betrachteten 160 Aufnahmepositionen ausschließlich in 16,9 Prozent der Fall. Für die weiteren Bohrlöcher ist eine korrekte Überlagerung der Bodenflächensegmente zu keinem Aufnahmezeitpunkt gegeben.

Für alle weiteren Bestandteile des Messobjektes „geometrische Formen“ erfolgt eine hinreichend genaue Segmentierung, so dass die Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten in diesen Bereichen mit 3D-Standardabweichungen analog zur Darstellung in Abbildung 5.4 (b) erfolgt.

## 5.6 Bewegungskompensierte 3D-Ergebnisse

Die Auswertung realer Bilddaten des 3D-Messsystems „hiScanp“ abschließend, werden an dieser Stelle Resultate der dreidimensionalen Bewegungsdetektion und folgend der 3D-Bewegungskompensation entsprechend der in den Abschnitten 3.2 und 3.3 vorgestellten Verfahren dargestellt. Die Datengrundlage bilden dabei die in Abschnitt 5.3 benannten Aufnahmesequenzen verschiedener Länge  $N$  und unterschiedlicher Bewegungsrichtungen sowie -geschwindigkeiten.

Wie bereits erwähnt, ermöglicht das 3D-Messsystem „hiScanp“ eine hochpräzise Steuerung der Relativpositionierung des jeweiligen Messobjektes in Bezug zum 3D-Sensor, weshalb diese Daten im Folgenden zur Referenz als Ground-Truth-Werte verwendet werden. Abbildung 5.8 zeigt die mittleren Abweichungen auf Basis der Resultate der Einzelaufnahmezeitpunkte bestimmten Bewegungsvektoren  $\tau^{6D}$ . Obwohl systembedingt ausschließlich Rotationsbewegungen induziert sind, wird ebenso der Translationsfehler gemessen, da insbesondere bei Betrachtung kleiner Bewegungen gehäuft keine eindeutige Trennung dieser Bewegungsanteile möglich ist [Brü11].

Vergleichbar mit den Resultaten synthetischer Bilddaten in Abschnitt 4.4 liegen mit Ausnahme von drei Werten alle in den Graphen 5.8 sowie der Tabelle A.2 dargestellten Abweichungen unter der Fehlergrenze von 10 Prozent. Dabei ist hervorzuheben, dass für kleine Winkelbewegungen  $\gamma \leq 4^\circ$  gegenüber den weiteren betrachteten Winkelwerten größere Abweichungen  $\epsilon(\tau^{6D})$  zu verzeichnen sind. Auch ist der Fehleranteil berechneter Translationsbewegung für diesen Bereich signifikanter. Die Ursache dessen liegt in der linearen Approximation geringer Winkelbewegungen durch Translationen. Mit steigender Winkelgröße nimmt die Eindeutigkeit der Trennbarkeit von Rotation und Translation zu, weshalb die Abweichungen im Allgemeinen sinken.

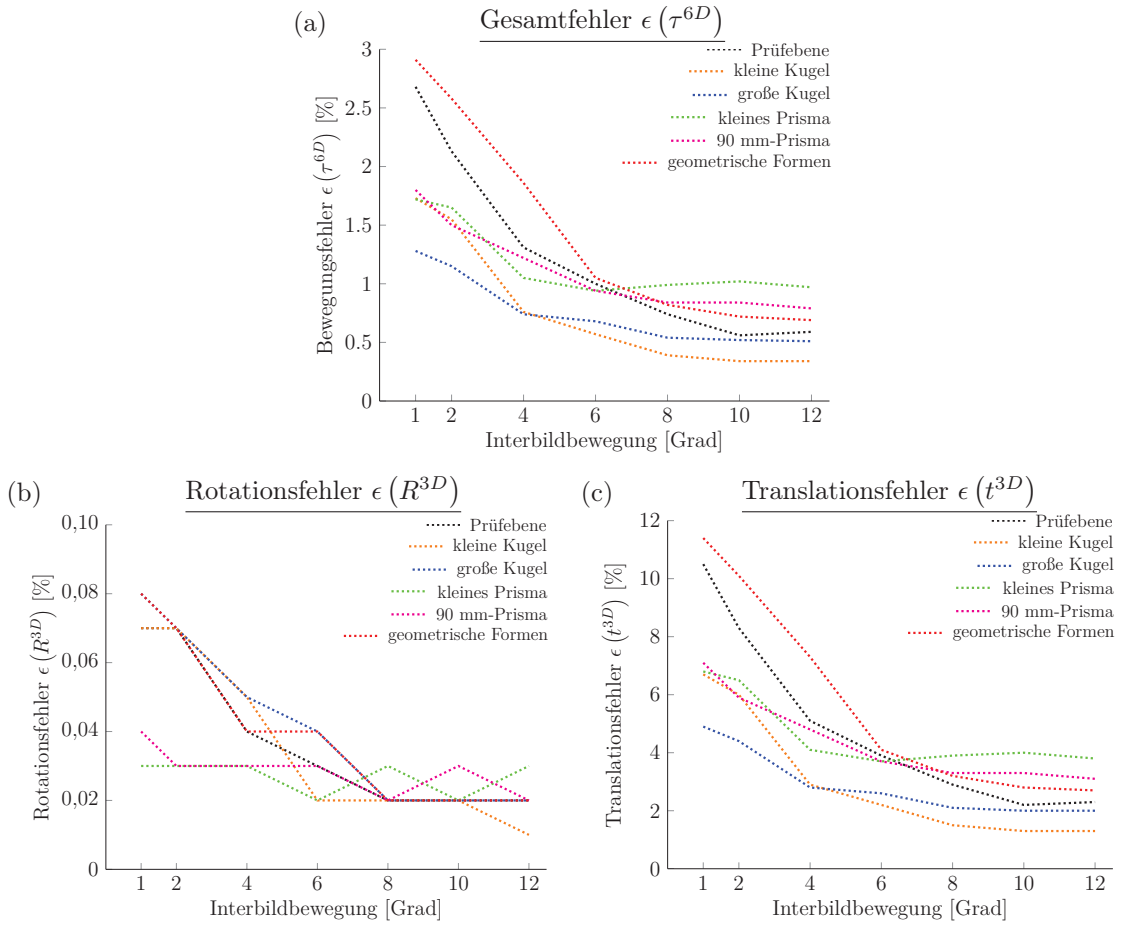


Abbildung 5.8: Prozentuale Abweichungen ermittelter Bewegungsgrößen  $\epsilon(\tau^{6D})$  zwischen 3D-Punktwolken je zwei aufeinander folgender Aufnahmezeitpunkte  $n$  gegenüber der systeminduzierten Ground-Truth-Rotationsbewegung. Die jeweils visualisierten Werte entsprechen (a) dem Gesamtfehler (Wichtung: 75 % Rotation, 25 % Translation), (b) dem Rotationsfehler, sowie (c) dem Translationsfehler.

Für das Messobjekt Prüfebene sind in Abbildung 5.8 nicht alle Einzelwerte berücksichtigt. Die Ursache dessen liegt in der Größe der Prüfebene begründet, wobei einige Bildaufnahmen keinen Ebenenrand beinhalten. Für diese Fälle werden zumeist sehr geringe Bewegungsgrößen bestimmt, womit die Abweichung zur Sollbewegung signifikant erhöht ist. Zur Vermeidung des Einflusses dieser stark von allen anderen Ergebnissen abweichenden Resultate, entsprechen die Mittelwerte in Abbildung 5.8 für die Prüfebene ausschließlich Ergebnissen von Aufnahmebildern mit einem Begrenzungsbezug des Messobjektes.

Während die Messobjekte „kleine Kugel“ und „kleines Prisma“, wie in den Fotodarstellungen in Abbildung 5.2 veranschaulicht, eine fest verbundene Grundebene besitzen, ist die große Kugel in Abbildung 5.2 (c) allein dargestellt. Die Bewegungsbestimmung eines rotationssymmetrischen Messobjektes ist allein auf Basis von 3D-Punktwolken insbesondere für Rotationsbewegungen schwer möglich. Aus diesen Grund ist dem Messobjekt analog den Ergebnisdarstellungen der Abbildungen 5.5 (a) und 5.6 (a) ein Kalibrierring hinzugefügt. Dieser besitzt aufgrund der Realisierungsweise der Relativbewegung über alle Messsequenzen einen festen Bezug zum eigentlichen Messobjekt

„große Kugel“. In Verbindung mit dieser planaren Fläche wird die Bewegungsbestimmung im dreidimensionalen Raum mit den Ergebnissen in Abbildung 5.8 ermöglicht.

Für die Variation des Alpha-Winkels, das heißt der Spiegelkipfung und damit einer simulierten X-Achsen-Rotation des Messobjektes, ergeben sich vergleichbare Effekte, wie für die Z-Achsen-Rotation grafisch veranschaulicht, weshalb auf eine explizite Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird.

Die sich an die Bewegungsdetektion im dreidimensionalen Raum anschließende 3D-Bewegungskompensation ist im Folgenden untersucht. Der Fokus liegt dabei auf den Auswerteparametern

- Bewegungsgeschwindigkeit beziehungsweise Blickwinkelvariation zwischen je zwei Aufnahmezeitpunkten  $n$ ,
- Länge der ausgewerteten Mustersequenz, wobei  $N = 4$ ,  $N = 8$  und  $N = 16$  untersucht wurden *und*
- Einfluss der 3D-Oberflächenkomplexität des jeweiligen Messobjektes: Planarität, Anzahl und Stärke von Kantenstrukturen, sowie die Gesamtkomplexität.

Den Ergebnissen in Abbildung 5.9 und den Tabellen 5.4 und A.3 kann entnommen werden, dass die Verwendung einer längeren Mustersequenz grundsätzlich Vorteile bietet und die 3D-Standardabweichung des jeweiligen Resultates reduziert. Objektabhängig erhöht sich allerdings die 3D-Standardabweichung zwischen den Versuchsreihen mit  $N = 8$  und  $N = 16$  wieder, was sich insbesondere bei größeren Winkelgeschwindigkeiten und damit verstärkt unterschiedlichen Sensorpositionen durch eine verschlechterte Bewegungsschätzung begründet. Des Weiteren werden dem Messergebnis verstärkt neue Objektbereiche hinzugefügt, so dass nicht für alle Bereiche eine ausgedehnte Mehrzahl an Eingabebildern zur Verfügung steht. Die im Verhältnis zum Berechnungsaufwand und der Zeitspanne für Musterprojektion und simultaner Bildaufnahme besten Ergebnisse lassen sich mit einer mittleren Sequenzlänge von  $N = 8$  erzielen.

Die einzelnen Messobjekte getrennt betrachtend lassen sich teilweise signifikante Ergebnisunterschiede in Bezug zur Objektkomplexität feststellen. Während die für eine planare Fläche große 3D-Standardabweichung bei der Analyse eines Einzelaufnahmezeitpunktes für das Messobjekt Prüfebene sehr gut über die Messsequenzen hinweg optimiert werden kann, ergeben sich für die „geometrischen Formen“ signifikant geringere Verbesserungen. Als Fehlerursachen sind hierbei die zahlreichen Kantenstrukturen, sowie durch teilweise große Höhenunterschiede der einzelnen Bereiche während der Messsequenz unterschiedlich verdeckter Bereiche festzustellen.

Für die anderen vier untersuchten Messobjekte lässt sich ableiten, dass in den Eingabebildern größer abgebildete Objektbereiche im Vergleich zu kleineren vergrößertes Optimierungspotenzial bezüglich der 3D-Bewegungskompensation besitzen. So liefern das 90 mm-Prisma und die große Kugel unabhängig der Bewegungsgeschwindigkeit bessere Resultate, als das kleine Prisma und die kleine Kugel mit ihren jeweiligen Untergrundebenen. Für die große Kugel sei auch an dieser Stelle die Verwendung des im Bezug zur Kugel statischen Kalibrierrings erwähnt, der eine Bewegungsdetektion und damit die Voraussetzung zur Kompensation erst ermöglicht.

Die Vergleiche verschiedener Bewegungsgeschwindigkeiten eines Messobjektes untereinander liefern ein ähnliches Bild, wie die Fehler-Auswertung der Bewegungsdetektion. Damit bestätigen sich die Grundvoraussetzungen möglichst präziser Einzelzeitpunktergebnisse, sowie einer guten Bewegungsdetektion im dreidimensionalen Raum.



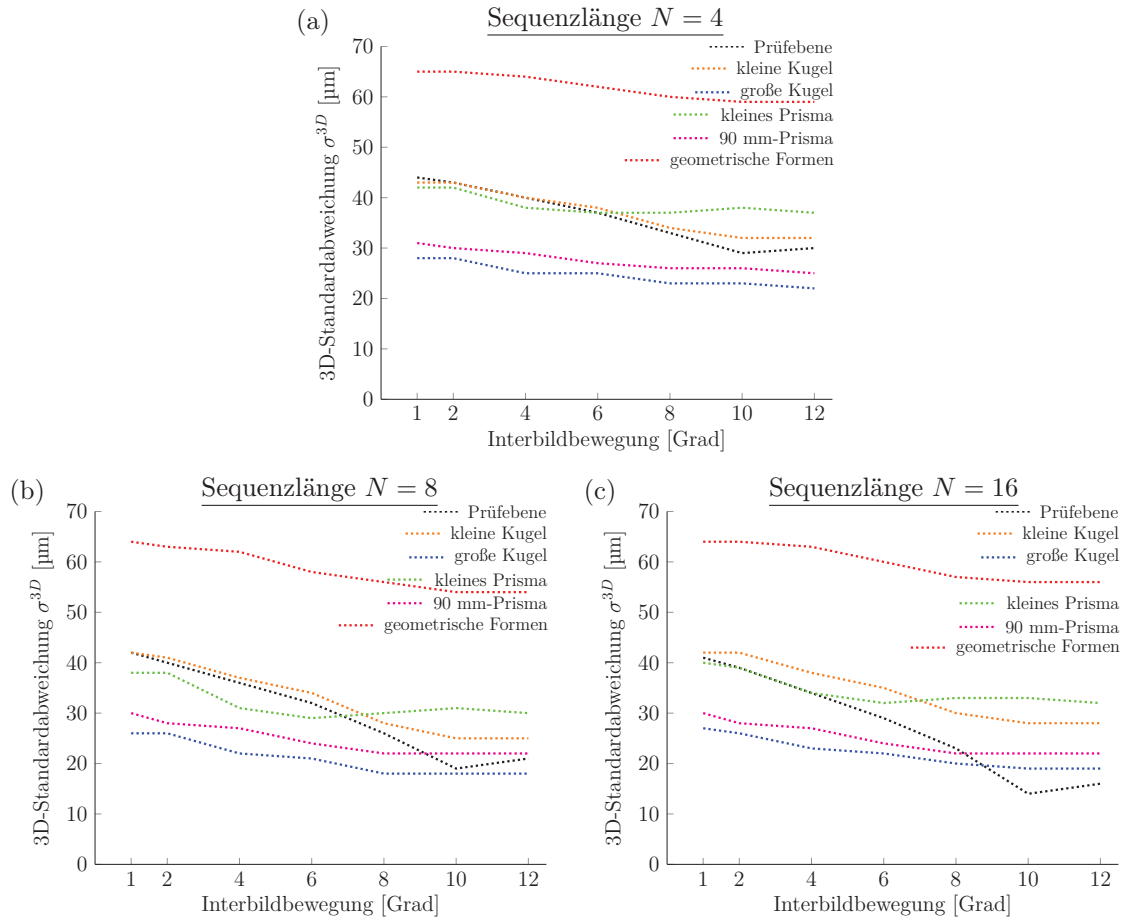


Abbildung 5.9: 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  zwischen bewegungskompensierten 3D-Punktwolken und dreiecksbasierten Oberflächenrepräsentationen des jeweiligen Messobjektes als vereinigt Resultat von zwölf Messpositionen und jeweiliger Verwendung einer vollständigen Mustersequenz.

Tabelle 5.4: Analog zu Abbildung 5.9 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  zwischen bewegungskompensierten 3D-Punktwolken und dreiecksbasierten Oberflächenrepräsentationen mit induzierter Rotationsbewegung um die X-Achse. Alle Ergebniswerte sind in Mikrometern angegeben.

Messobjekt	Rotation um X-Achse ( $\alpha$ )		
	$-1^\circ$	$-2^\circ$	$-3^\circ$
Prüfebene	39 / 35 / 32	37 / 31 / 28	34 / 27 / 23
kleine Kugel	39 / 36 / 37	38 / 35 / 36	36 / 31 / 33
große Kugel	27 / 24 / 25	26 / 23 / 24	25 / 21 / 23
kleines Prisma	42 / 38 / 39	42 / 37 / 39	40 / 35 / 36
90 mm-Prisma	30 / 28 / 28	29 / 26 / 26	28 / 25 / 25
geometrische Formen	63 / 60 / 61	62 / 59 / 60	61 / 57 / 59

Die numerische Auswertung von Abbildung 5.9 visualisierend, sind im Folgenden sowohl dreiecksbasierte Oberflächenrekonstruktionen als auch 3D-Fehlerverteilungen für vier verwendete Messobjekte grafisch veranschaulicht. Die Bilder spiegeln bei Verwendung einer 8-Phasenmuster umfassenden Messsequenz jeweils das pro Messobjekt beste Ergebnis mit geringster 3D-Standardabweichung wider.

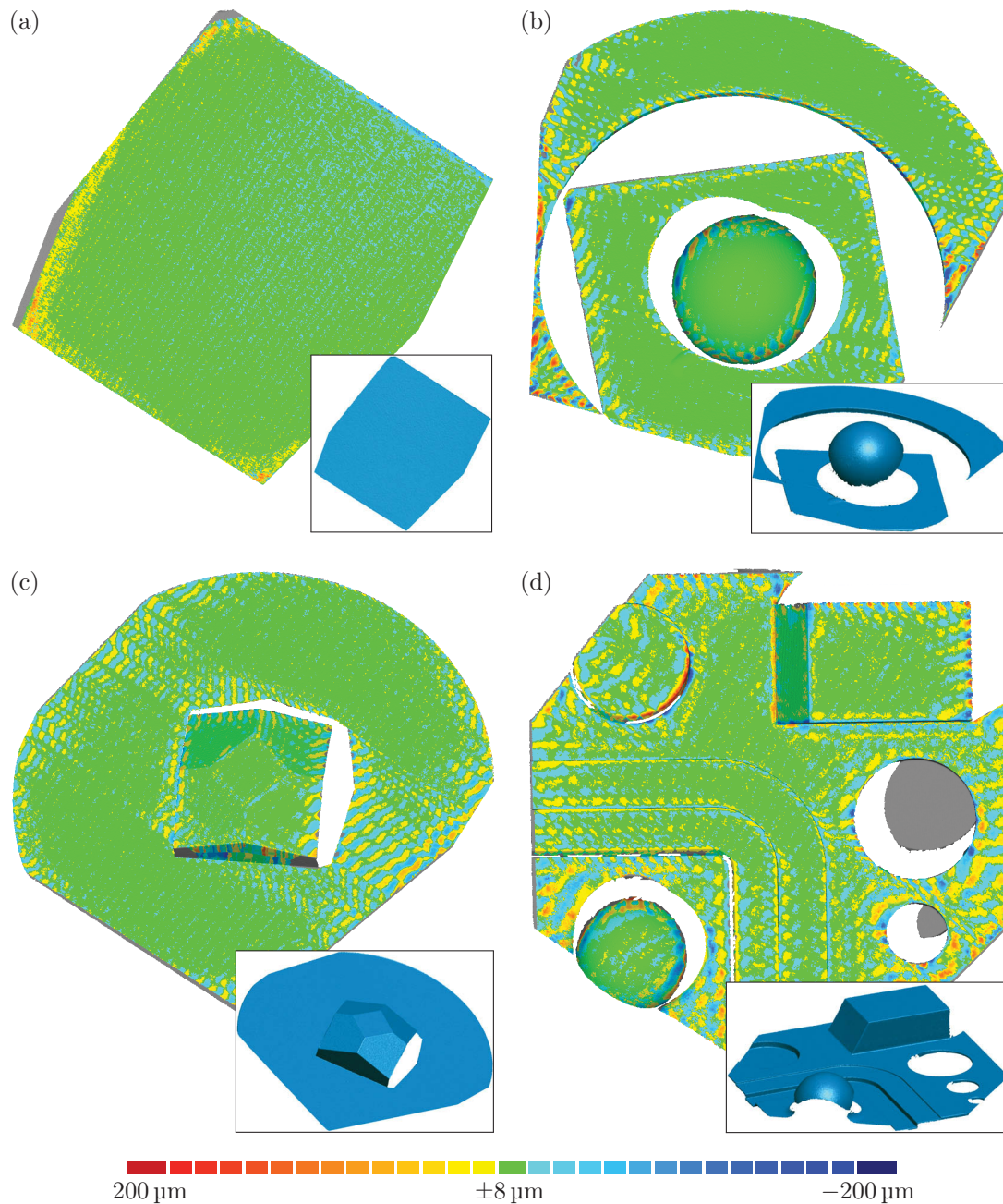


Abbildung 5.10: Visualisierung der 3D-Fehlerverteilungen bei einer Sequenzlänge von  $N = 8$  für die Messobjekte (a) Prüfebene, (b) kleine Kugel (mit Kalibrierring), (c) kleines Prisma, sowie (d) „geometrische Formen“. Graue Bereiche entsprechen durch die 3D-Bewegungskompensation nicht rekonstruierten Objektteilen des Ground-Truth-Modells. Jeweils rechts unten eingeklinkt befindet sich eine blau eingefärbte, räumliche Darstellung der dreiecksbasierten Oberflächenrekonstruktion.



Noch ohne Antwort bleiben heute Fragen –  
doch ohne schwarz zu sehen, lässt uns einen Ausblick wagen.

(Klaus Klages)

## Kapitel 6

### Zusammenfassung und Ausblick

Im Fokus dieser Arbeit stand die Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten von relativ zum 3D-Sensorsystem bewegten makroskopischen Objekten. Das Sensorsystem besteht dabei aus zwei Kameras und einer Projektionseinheit, wobei letztere für die Abbildung temporärer Texturen in Form von  $(1 + \cos)$ -Streifenmustern in die Messszene zuständig ist. Diese Texturen bilden die Basis zur Korrespondenzpunktermittlung zwischen den zwei Kamerabildebene und sind damit grundlegend für die berührungslose 3D-Objektrekonstruktion.

In Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen der 3D-Datenberechnung dynamischer Messszenen mit quasi-statischem Ansatz wurde in dieser Arbeit auf die Verwendung von Hochgeschwindigkeitshardware, sowohl für die Musterprojektion als auch Bildaufnahme verzichtet. Grundlegend neu ist ein Ansatz der Kompensation existierender Bewegung, welcher keine zusätzlichen Muster zur Bewegungsbestimmung benötigt. Hierfür werden die notwendigen Interferogramme beider Kameraansichten jeweils eines Aufnahmezeitpunktes mithilfe einer Frequenzanalyse durch Fouriertransformation, sowie einem erweiterten Algorithmus zur  $2\pi$ -Phasenverstetigung in 3D-Punktwolken absoluter Position im Raum überführt. Der Positionsvergleich zeitlich aufeinander folgender 3D-Punktwolken im Raum führt zur Schätzung sechs-dimensionaler Bewegungsvektoren, welche im Anschluss kompensierend sowohl auf die zweidimensionalen Aufnahmebilddaten als auch den über eine Messsequenz notwendigen Phasenschub der Musterprojektion lokal angewendet werden. Die bewegungskompensierten Daten bilden abschließend die Basis zur Korrespondenzbestimmung zwischen den Kamerabildebene und der 3D-Koordinatenermittlung analog zu optischen Messverfahren mit statischem Ansatz.

#### Zusammenfassung

In diesem Abschnitt sind die wesentlichsten Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

Grundlegend für die Bestimmung sechs-dimensionaler Bewegungsvektoren, sowie für die anschließende Kompensation existierender Relativbewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor sind Mengen dreidimensionaler Objektkoordinaten mit absoluter Position innerhalb eines a priori determinierten Weltkoordinatensystems. Diese wurden unter bestmöglichem Ausschluss von Bewegungseinflüssen aus Bildaufnahmen jeweils eines Aufnahmezeitpunktes bestimmt. Diese Bestimmung erfolgte durch eine Frequenzanalyse von Grauwert-Interferogrammen in  $(1 + \cos)$ -Form mithilfe der Fouriertransformation. Die Durchführung derer kann sowohl ein- oder zweidimensional, global über das gesamte Bild oder fensterbasiert für Bildteile durchgeführt werden. Dabei zeigen die Resultate der Abschnitte 4.3.1 und 4.3.2 weitgehend unabhängig der Oberflächenkomplexität des jeweiligen Messobjektes, sowie der Bildpunktanzahl verwendeter Kameraaufnahmen signifikante Vorteile einer zweidimensionalen, fensterbasierten Frequenzanalyse. Für Bildauflösungen größer  $512^2$  Pixel wird den Ergebnissen folgend die teilüberlagernde Verwendung von Fenstern fester

Größe und einer Medianbildung für jeden Bildpunkt bestimmter Rohphasenwerte (2D-WFT) gegenüber einer Filterung mit Bildinhalt abhängiger Fenstergrößenermittlung ohne Fensterüberlagerung (2D-AWFTP) präferiert. Der FTP-Referenzansatz unter Nutzung ausschließlich eines Kamerabilde pro Aufnahmezeitpunkt, sowie einer Bandpassfilterung des ersten Trägerfrequenzpeaks schneidet in Bezug der Genauigkeit ermittelter 3D-Daten mit Ausnahme sehr kleiner Bildauflösungen wie  $256^2$  Pixel gegenüber einer Zweikameralösung (SSSA-Systemanordnung) mit Hochpassfilterung durchgehend schlechter ab; im Maximum um Faktor 1,6. Die Hochpassfilterung ermöglicht den Erhalt von Kantenstrukturen des Messobjektes, besitzt aufgrund des Filterdesigns aber auch Nachteile beim Umgang mit Intensitätsrauschen. Dabei wurde in Abschnitt 4.6.3 gezeigt, dass insbesondere für hohe Signal-Rausch-Verhältnisse  $\xi_{\text{RMS}} > 2,5$  beziehungsweise Grauwertabweichungen von  $|\widehat{\xi_{\text{RMS}}}| > 13,6$  die 3D-Daten mithilfe des Hochpass basierten SSSA-Verfahrens schlechter ausfallen, als die Bandpassanwendung des FTP-Ansatzes. Für durch aktuelle Kamerasysteme gegebene Größen an Intensitätsrauschen dominiert aber, wie durch die Ergebnisse in Kapitel 5 gezeigt, der Vorteil der Kantenerhaltung unter Verwendung eines Hochpassfilters, welcher bei Bedarf auf einen mehrere Frequenzpeaks umfassenden Bandpass eingeschränkt werden kann.

Eine Zwei- oder Mehrkameralösung setzt neben einer bekannten Systemkalibrierung die Bestimmung von Punktkorrespondenzen zwischen den Bildebenen voraus. Dies kann ausschließlich durch die Bereitstellung möglichst eindeutiger Bildpunktcodierungen erfolgen, wofür die temporäre Musterprojektion in  $(1 + \cos)$ -Form genutzt wird. Unter Suchraum einschränkender Anwendung der sogenannten Epipolargeometrie ist eine eindimensional eindeutige Codierung hinreichend, soweit diese Dimension nicht weitgehend parallel zu der Schar von Epipolarlinien verläuft. Diese eindimensionale Eindeutigkeit wird durch  $2\pi$ -Verstetigung der Rohphasen ermöglicht. Die dabei existierende Herausforderung der korrekten Addition Vielfacher von  $2\pi$  auf die Rohphasenwerte an Unstetigkeitsstellen der Objektoberfläche ist unter anderem durch Verwendung sogenannter Verstetigungspfade, wie sie von Herráez et al. vorgestellt wurden, möglich. Für Objektbereiche, welche an keiner Stelle einen stetigen Übergang zu anderen Objektbereichen besitzen wurde in Abschnitt 3.2.1.5 ein Verfahren zur sukzessiven Angleichung von Feinphasenwerten vorgestellt. Hierzu wird nach erfolgreicher Bildsegmentierung innerhalb jedes Segmentes eine  $2\pi$ -Phasenverstetigung nach Herráez durchgeführt und zwischen diesen Feinphasenwerten mithilfe der Systemkalibrierung und ohne Beschränkung der Allgemeinheit mit der ersten Kamera als Master trianguliert. Für die ermittelten 3D-Koordinaten erfolgt eine Projektion in die zweite Kamerabildebene mit anschließendem Überlagerungsvergleich mit dem zugehörigen Bildsegment der zweiten Kamera. Dieser Vorgang wird für eine Mehrzahl an Vielfachen von  $2\pi$  durchgeführt, wobei die offensichtlich korrekte Phasenverstetigung jene ist, welche die bestmögliche Überlagerung zwischen der 3D-Daten-Abbildung in die zweite Kamerabildebene und dem zugehörigen Bildsegment liefert. Die Resultate in Abschnitt 4.3.3 sowie für die im Abschnitt 5.5 ausgewerteten Realmessszenen mit 3D-Fehlern  $\epsilon^{3D} < 70 \mu\text{m}$  zeigen die Funktionsfähigkeit dieses Verfahrens auf. Limitierend ergibt sich die Verwendung eines 3D-Sensors mit im Vergleich zu Größenordnungen existierender Objektkonkavitäten großer Triangulationsbasis, wodurch der Bildsegmentvergleich für verschiedene sichtbare Teile des gleichen Segmentes zwischen den Kamerabildebene erfolgt und wie am Beispiel der Bohrungen des Messobjektes „geometrische Formen“ in Abbildung 5.4 (b) mit  $\epsilon^{3D} > 4.000 \mu\text{m}$  gezeigt fehlschlägt.

Für die Kompensation von Bewegung stellt die Ermittlung von Bewegungsvektoren beziehungsweise Bewegungsvektorfeldern zwischen verschiedenen Aufnahmezeitpunkten neben bestmöglichen

Grob-3D-Daten einen wesentlichen Punkt präziser 3D-Objektrekonstruktionen dynamischer Objekte dar. Die in Abschnitt 4.4 gegebenen Auswertungen, sowie der Vergleich von Systemwerten mit der Bilddaten getriebenen Ermittlung lokaler 6D-Bewegungsvektoren in Abschnitt 5.6 spiegeln wider, dass das Vorgehen des als ICP bekannten Ansatzes zur sogenannten Registrierung zweier 3D-Punktwolken für Bewegungen  $\Delta t < 10$  mm beziehungsweise  $\Delta R < 10^\circ$  mit Abweichungen kleiner 3 Prozent und damit einer hohen Präzision erfolgt. Dabei sind Fehler in der Anteilszuordnung zur Translation oder Rotation für die weitere Verwendung dieser Daten vernachlässigbar.

Neben der Kompensation von Bewegungseinflüssen gilt es ebenso Variationen der Beleuchtung, sei es durch veränderte Sekundärlichtquellen oder insbesondere veränderte Einfallswinkel der Musterprojektion auf das Messobjekt auszugleichen. Die Bestimmung dazu notwendiger Kompensationsterme ist einerseits direkt im Prozess der Fouriertransformation auf Basis entsprechender Frequenzfilterung möglich, andererseits lassen sich mit Kenntnis grober 3D-Punktwolken als Einzelzeitpunktergebnis in Verbindung mit Sollwerten des Phasenschiebens die Beleuchtungsparameter lokal bestimmen. Wie Abschnitt 4.5.1 zeigt, ermöglicht ein objektabhängiges Filterdesign die Ermittlung von Beleuchtungswerten mit Abweichungen im Mittel kleiner 9 Grauwerte, im Maximum allerdings bis zu 116 Grauwerten direkt während der Frequenzanalyse mithilfe der Fouriertransformation. Das geeignete Filterdesign wird dabei insbesondere bei niedriger bis mittlerer Anzahl an  $(1 + \cos)$ -Perioden von 32 bis 64 durch Überlagerung einzelner Frequenzpeaks erschwert beziehungsweise unterbunden, sodass signifikante Kantenglättungen und der Verbleib temporärer Musterstrukturen unausweichlich sind und die Anwendung dieses Ansatzes verhindern. Der in Abschnitt 3.3.3.2 vorgestellte Algorithmus 3.1 hingegen liefert insbesondere durch Anwendung adaptiver Fenstergrößen und -ausdehnungen gute bis sehr gute Parameterwerte für die Objektbeleuchtung jedes Aufnahmezeitpunktes. Gegenüber der Beleuchtungsermittlung während des Fourierprozesses ergibt sich eine Verbesserung um Faktor 3. Eingeschränkt wird das adaptive Verfahren allerdings durch zusätzliche Beleuchtungsquellen oder Abschattungen nicht zur Messszene gehörender Objekte, vorwiegend an deren Übergangsbereichen zur reinen Messbeleuchtung.

Abschließend wurde der Vergleich zwischen statischen Messsituationen, 3D-Datenbestimmungen mit Eingabedaten ausschließlich eines Aufnahmezeitpunktes, dem vollautomatischen Zusammensetzen von Einzel-3D-Punktwolken, sowie der in dieser Arbeit im Fokus stehenden 3D-Bewegungskompensation gezogen. Dabei liefert das statische Messverfahren mit Abstand die besten Ergebnisse von etwa  $5 \mu\text{m}$ . Die Auswertung dynamischer Messszenen zeigt, dass mithilfe einer Einzelzeitpunkt Betrachtung zufriedenstellende Resultate im Bereich von  $50 \mu\text{m}$  erzielt werden, die durch vollautomatisches Zusammensetzen mehrerer dieser um bis zu 5 Prozent leicht verbessert werden können. Eine signifikante Optimierung dreidimensionaler Objektrekonstruktionen dynamischer Messsituationen stellt die Anwendung der vorgestellten 3D-Bewegungsdetektion mit anschließender 3D-Bewegungskompensation dar, welche im Schnitt zwar eine viermal so hohe 3D-Standardabweichung gegenüber dem statischen Ansatz aufweist, Einzelzeitpunktauswertungen aber um bis zu 61 Prozent verbessern kann. Den Ergebnissen auf Realdaten des 3D-Tischdigitalisierers „hiScanr“ ist zu entnehmen, dass eine größere Anzahl paarweise disjunkter Musterprojektionen ( $N = 8$  gegenüber  $N = 4$ ) grundsätzlich zu besseren 3D-Standardabweichungen bei der Bewegungskompensation führt. Dieser Vorteil wird für Sequenzlängen mit  $N \geq 16$  allerdings durch verstärkte Fehlerpropagationen der Bewegungsschätzung insbesondere bei sehr kleinen Bewegungen sowie großen Bewegungen mit teilweise signifikant verschiedenen Blickwinkeln egalisiert.



## Ausblick

Die Arbeitsschritte 3D-Rückprojektion beziehungsweise Raytracing zum 3D-2D-Übergang während der Kompensation existierender Relativbewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor besitzt aufgrund verwendeter Interpolationsalgorithmen ausschließlich Abhängigkeiten zur Systemkalibrierung, bei deren Bestimmungsvorgang nur marginales Optimierungspotenzial besteht. Weiterreichender sind Fortentwicklungen dem jeweiligen Messobjekt angepassten Frequenzfilterung zur Bestimmung von Rohphasen  $\phi_{\text{rel}}$ . Hierzu wurden mit fensterbasierten Verfahren mit Bildinhalt abhängiger Segmentierung einerseits (2D-AWFT) und fester Fenstergröße mit Teilüberlagerung und Medianbildung andererseits (2D-WFT) bereits Verfahren der aktuellen Forschung entwickelt und getestet. Eine Kombination beider Ansätze, zum Beispiel der 2D-WFT-Anwendung innerhalb eines Objektsegmentes, sowie der 2D-AWFT mit vergrößerten Segmentgrenzen an deren Rändern versprechen leichte Verbesserungen hinsichtlich der 3D-Standardabweichung grober 3D-Punktwolken je eines Aufnahmezeitpunktes. Ebenso ist die Verwendung einer breiten Bandpassfilterung über mehrere Frequenzpeaks gegenüber einer ausschließlichen Hochpassfilterung zum erweiterten Ausschluss von Intensitätsrauschen bei gleichzeitiger Beibehaltung von Kantenstrukturen denkbar.

Ein industrieller Einsatz der vorgestellten Algorithmen setzt eine stark parallelisierte Implementierung mit optimiertem Speichermanagement voraus. Sowohl die Frequenzfilterung als auch die Ansätze zur  $2\pi$ -Phasenverstetigung und lokalen Beleuchtungsbestimmung besitzen eine hohe Komplexität, so dass die aktuelle MATLAB-Umsetzung zu Berechnungszeiten mehrerer Minuten auf einem Intel i7-System erster Generation führt. Insbesondere bei Anwendung der Frequenzanalyse mit fester Fenstergröße und signifikanter Fensterüberlagerung ist das verwendete Rechensystem mit 8 GB Arbeitsspeicher ab Bildgrößen von  $3.072^2$  Pixel ausgelastet. Hier gilt es eine effizientere Möglichkeit der Zwischenspeicherung zur Medianbestimmung zu finden.

Großes Anwendungspotenzial besteht in der dreidimensionalen Rundumvermessung makroskopischer Objekte. Hierbei scheitern bisher zahlreiche Verfahren an einer robusten Vereinigung verschiedener Objektansichten. Eine Lösung dieses Problems ist möglicherweise durch die bewegungskompensierte Auswertung eines vollständigen Videos gegeben. Hierzu würden Teilsequenzen von beispielsweise acht Musterprojektionen für ein Teil-3D-Ergebnis ausgewertet. Zur Erleichterung des abschließenden Zusammensetzens aller Teil-Ergebnisse empfiehlt sich die überlagernde Auswertung von Videoteilsequenzen. Diese Überlagerung minimiert die maximale Bewegung zwischen zwei Referenzansichten und ermöglicht damit ein zuverlässiges Zusammensetzen. Diese Vorteile werden allerdings wieder mit signifikanter Erhöhung der Rechen- und Speicherkapazität erkauft.

Wer Anhänger hat, hat auch Anhängsel.

(Peter Sirius)

## Anhang A

### Weiterführende Ergebnisse

#### 3D-Objektrekonstruktion durch Einzelbildanalyse

Tabelle A.1: Vergleich der zweidimensionalen Analyseverfahren von Interferogrammen auf FTP-Basis: 2D-FTP und 2D-AWFTP. Das FTP-System ist gekennzeichnet durch Verwendung ausschließlich einer Kamera, eines Projektionssystem, sowie der 3D-Koordinatenbestimmung durch Vergleiche von  $\phi_{\text{abs}}$ -Feinphasenwerten mit einer Referenzebene  $R$ . Die in Pixel [px] angegebenen Bildgrößen entsprechen der Ausdehnung einer Seite des ansonsten quadratischen Bildes. Ergebnisse in Mikrometern [ $\mu\text{m}$ ] spiegeln 3D-Standardabweichungen  $\sigma(\epsilon(\{O_k\}))$  zwischen der berechneten 3D-Punktwolke und der dreiecksbasierten Oberfläche des jeweiligen Ground-Truth-Modells wider.

		64 (1 + cos) Perioden							
	Verfahren	256	384	512	768	1.024	1.536	2.048	[px]
Halbkugel	2D-FTP	86	46	45	45	45	45	45	[ $\mu\text{m}$ ]
	2D-AWFTP	80	45	43	42	41	41	41	[ $\mu\text{m}$ ]
Prisma	2D-FTP	172	145	145	145	143	138	135	[ $\mu\text{m}$ ]
	2D-AWFTP	95	60	55	55	55	55	54	[ $\mu\text{m}$ ]

		32 (1 + cos) Perioden							
	Verfahren	256	384	512	768	1.024	1.536	2.048	[px]
Halbkugel	2D-FTP	188	180	180	177	176	176	176	[ $\mu\text{m}$ ]
	2D-AWFTP	59	58	58	58	58	57	57	[ $\mu\text{m}$ ]
Prisma	2D-FTP	428	366	351	348	347	347	333	[ $\mu\text{m}$ ]
	2D-AWFTP	84	83	83	82	82	82	82	[ $\mu\text{m}$ ]

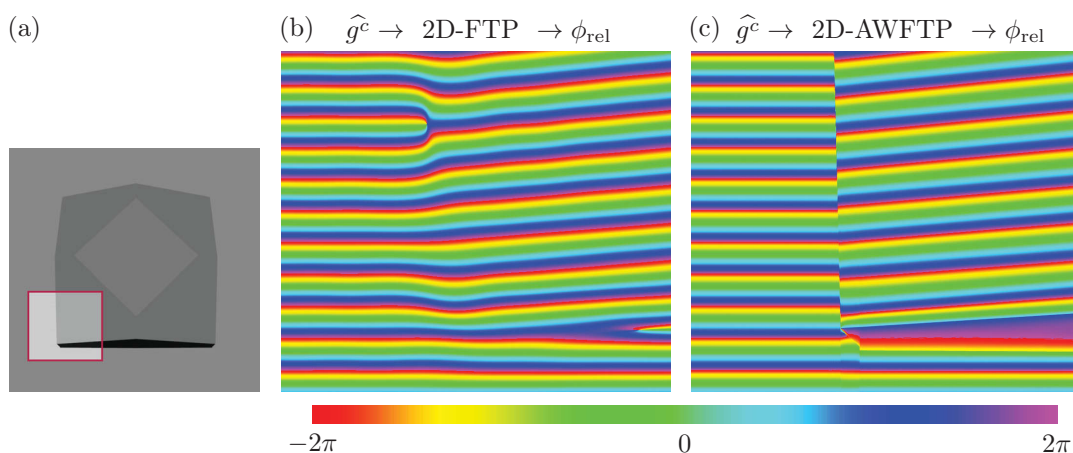


Abbildung A.1: Einfluss der Bildsegmentierung auf die Frequenzanalyse von Streifenlichtbildern in  $(1 + \cos)$ -Form am Beispiel des Messobjektes Prisma. (a) Bildausschnitt der visualisierten Rohphasenverteilungen bei (b) globaler Frequenzanalyse beziehungsweise (c) fensterbasierter Analyse mit adaptiver Fenstergröße und -lage (in Teilen ähnlich zu Abb. 2.8 in [Mül14]).

### 3D-Fehlerverteilungen bei Einzelzeitpunktauswertung (VV2) und vollautomatischem Zusammensetzen (VV3)

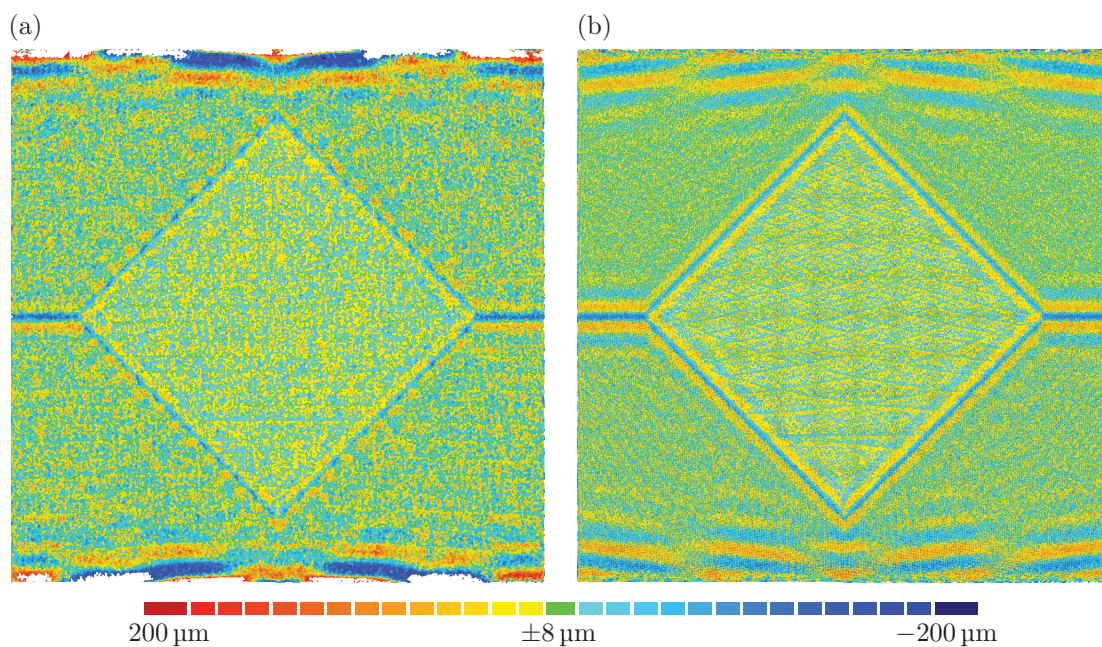


Abbildung A.2: 3D-Fehlerverteilungen des Messobjektes Prisma bei Anwendung (a) der Auswertung von Bilddaten eines Einzelzeitpunktes mithilfe der SSSA-Systemanordnung (VV2) – konkret Zeitpunkt  $n = 8$  –, sowie (b) des vollautomatischen Zusammensetzens der Einzelzeitpunktauswertungen durch Verwendung des 3D-Inspektionsprogramms „Geomagic Qualify 12“ (VV3).

### Direkte Bestimmung von Beleuchtungsparametern im Prozess der Fourieranalyse

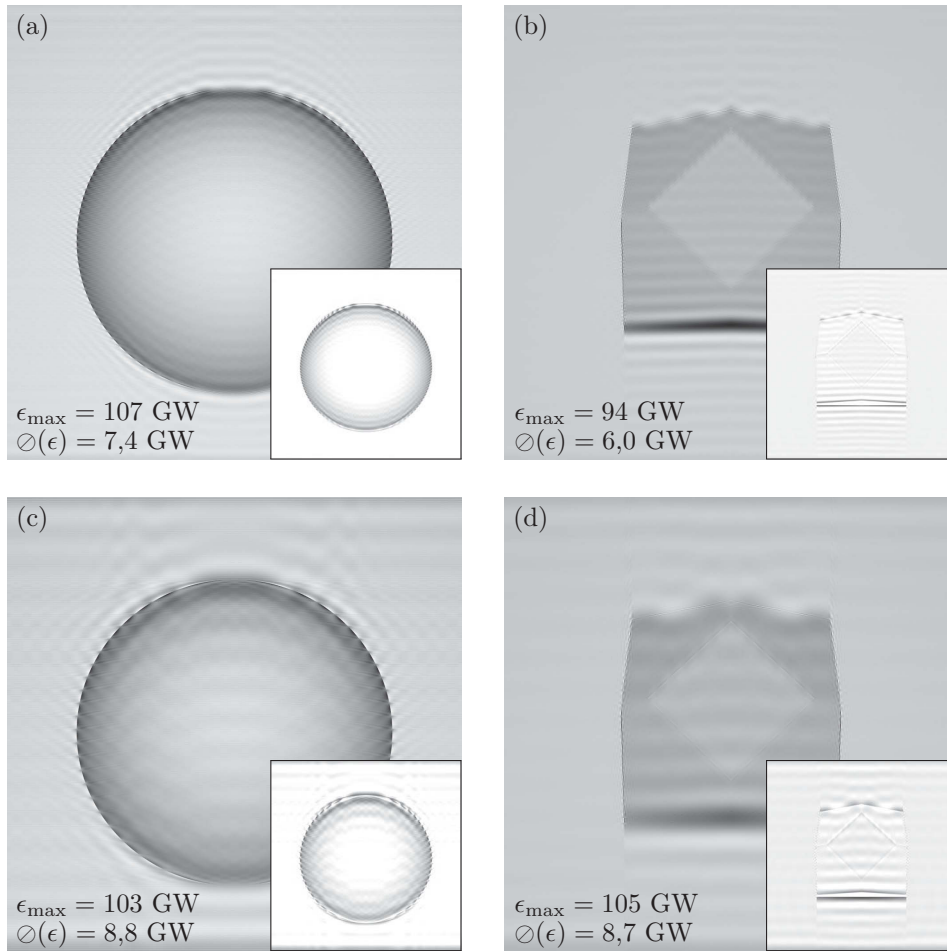


Abbildung A.3: Visualisierung der Intensitätsbilder  $I_n^c$  nach Elimination der Trägerfrequenzen und ihrer Vielfachen im Spektralbereich von  $Q_1$  bis  $Q_n$  für die Messobjekte Halbkugel (linke Spalte) und Prisma (rechte Spalte). Für die in (a) und (b) dargestellten Ergebnisse erfolgte eine Musterprojektion mit 64  $(1 + \cos)$ -Perioden, die Ergebnisse (c) und (d) basieren auf einer 32-periodischen Projektion. Im jeweils unten rechts eingeklinkten Bild sind die Abweichungen zwischen Ground-Truth-Daten (zugehöriges Hellbild) und durch Fourieranalyse erzielte Beleuchtungsverteilungen dargestellt. Dabei entspricht eine Codierung in schwarz dem pro Ergebnis maximalen Intensitätsfehler und weiß einer Abweichung von approximativ 0 Grauwerten.



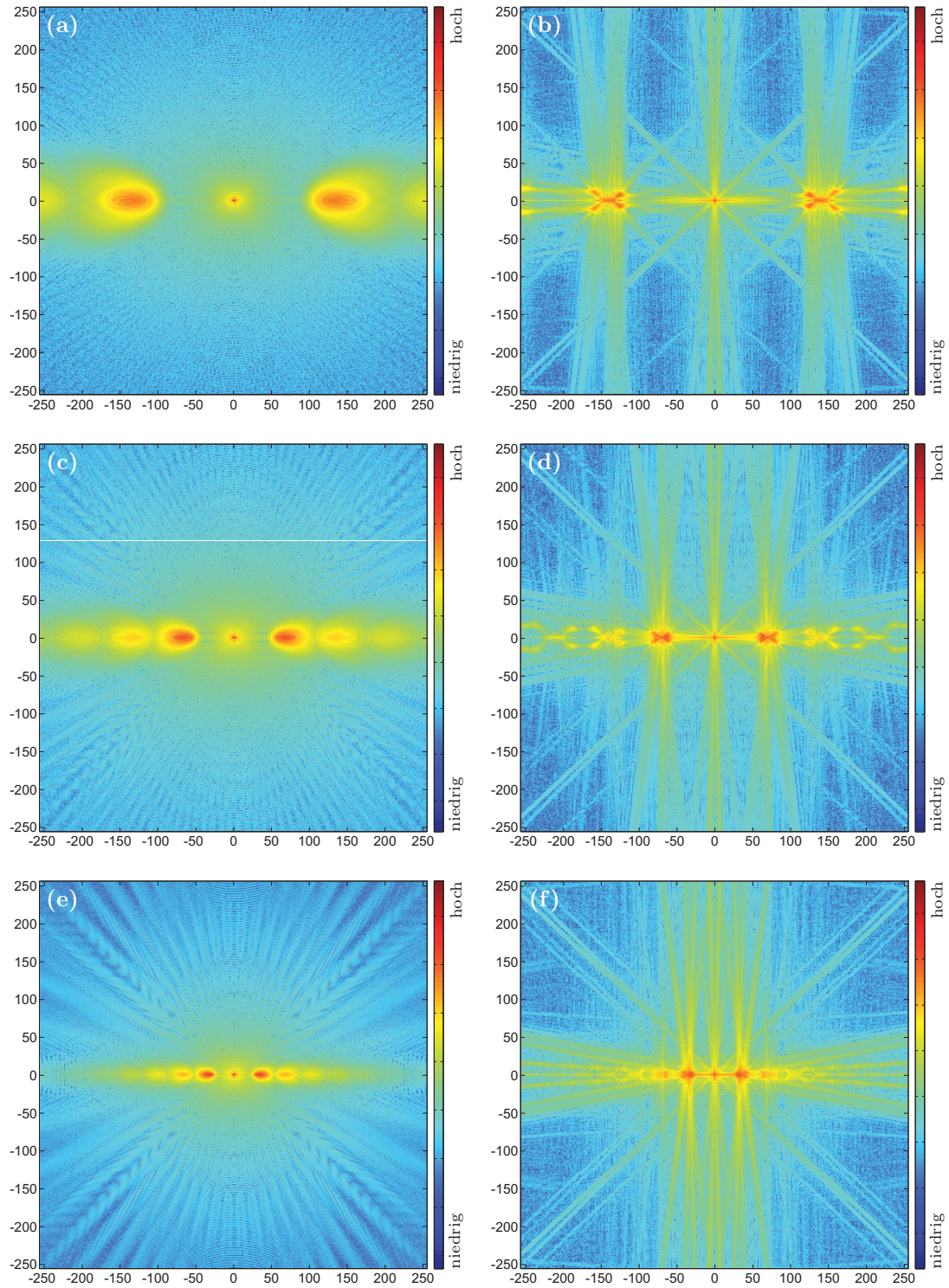


Abbildung A.4: Frequenzspektren der Messobjekte Halbkugel (linke Spalte) und Prisma (rechte Spalte). Die temporäre Musterprojektion in die Messszene erfolgte für die Frequenzverteilung von (a) und (b) mit 128 ( $1 + \cos$ ) Perioden, was bei einer quadratischen Projektorauflösung von 1.024 px einer Periodenbreite von 8 px entspricht. Die Verteilungen (c) und (d) basieren auf 64 Perioden mit je 16 px Breite, für (e) und (f) wurden 32 Perioden projiziert. Der detaillierten Sichtbarkeit ist ausschließlich der niederfrequente Anteil jedes Spektrums visualisiert.

## Fehler bei der Bewegungsschätzung unter Verwendung realer Bilddaten

Tabelle A.2: Prozentuale Abweichungen ermittelter Bewegungsgrößen  $\epsilon(\tau^{6D})$  zwischen 3D-Punktwolken je zwei aufeinander folgender Aufnahmezeitpunkte  $n$  gegenüber der systeminduzierten Ground-Truth-Rotationsbewegung. Die jeweils angegebenen drei Werte entsprechen von oben nach unten dem Rotationsfehler  $\epsilon(R^{3D})$ , dem Translationsfehler  $\epsilon(t^{3D})$ , sowie dem Gesamtfehler  $\epsilon(\tau^{6D})$  mit der Wichtung 75 % Rotation, 25 % Translation). Für das Messobjekt Prüfebene sind nicht alle Einzelwerte berücksichtigt, weshalb diese Zeile mit einer Stern-Markierung versehen ist. Die Ursache ist im Bezug zu Abbildung 5.8 ausführlich erläutert.

Messobjekt	Rotation um Z-Achse ( $\gamma$ )							
	1°	2°	4°	6°	8°	10°	12°	
Prüfebene*	0,07	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	$R$
	10,5	8,3	5,1	3,9	2,9	2,2	2,3	$t$
	2,7	2,1	1,3	1,0	0,7	0,6	0,6	$\tau$
kleine Kugel	0,07	0,07	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	$R$
	6,7	6,0	2,9	2,2	1,5	1,3	1,3	$t$
	1,7	1,6	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	$\tau$
große Kugel	0,08	0,07	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	$R$
	4,9	4,4	2,8	2,6	2,1	2,0	2,0	$t$
	1,3	1,2	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	$\tau$
kleines Prisma	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	$R$
	6,8	6,5	4,1	3,7	3,9	4,0	3,8	$t$
	1,7	1,7	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0	$\tau$
90 mm-Prisma	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	$R$
	7,1	5,9	4,8	3,7	3,3	3,3	3,1	$t$
	1,8	1,5	1,2	0,9	0,8	0,8	0,8	$\tau$
geometrische Formen	0,08	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	$R$
	11,4	10,1	7,3	4,1	3,2	2,8	2,7	$t$
	2,9	2,6	1,9	1,1	0,8	0,7	0,7	$\tau$



**3D-Standardabweichungen bewegungskompensierter 3D-Punktwolken**

Tabelle A.3: 3D-Standardabweichungen  $\sigma^{3D}$  zwischen bewegungskompensierten 3D-Punktwolken und dreiecksbasierten Oberflächenrepräsentationen des jeweiligen Messobjektes als vereinigt Resultat von zwölf Messpositionen und jeweiliger Verwendung einer vollständigen Mustersequenz. Alle Ergebniswerte sind in Mikrometern angegeben.

Messobjekt	Rotation um Z-Achse ( $\gamma$ )							$N$
	1°	2°	4°	6°	8°	10°	12°	
Prüfebene	44	43	40	37	33	29	30	4
	42	40	36	32	26	19	21	8
	41	39	34	29	23	14	16	16
kleine Kugel	43	43	40	38	34	32	32	4
	42	41	37	34	28	25	25	8
	42	42	38	35	30	28	28	16
große Kugel	28	28	25	25	23	23	22	4
	26	26	22	21	18	18	18	8
	27	26	23	22	20	19	19	16
kleines Prisma	42	42	38	37	37	38	37	4
	38	38	31	29	30	31	30	8
	40	39	34	32	33	33	32	16
90 mm-Prisma	31	30	29	27	26	26	25	4
	30	28	27	24	22	22	22	8
	30	28	27	24	22	22	22	16
geometrische Formen	65	65	64	62	60	59	59	4
	64	63	62	58	56	54	54	8
	64	64	63	60	57	56	56	16

## Literaturverzeichnis

- [AR07] H. S. Abdul-Rahman, M. A. Gdeisat, D. R. Burton, M. J. Lalor, F. Lilley und C. J. Moore. „Fast and robust three-dimensional best path phase unwrapping algorithm“. In: *Applied Optics* 46.26 (Sep. 2007), S. 6623–6635. DOI: 10.1364/AO.46.006623.
- [All14] Allied Vision Technologies GmbH. *Kompakte, flexible, modulare IEEE 1394 1,5 Megapixel C-Mount-Kamera*. deutsch. Allied Vision Technologies GmbH. 2014. URL: <http://www.alliedvisiontec.com/de/products/cameras/firewire/marlin/f-145bc.html>.
- [Bes92] P. J. Besl und N. D. McKay. „A method for registration of 3-D shapes“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14.2 (Feb. 1992), S. 239–256. ISSN: 0162-8828. DOI: 10.1109/34.121791.
- [Bia14] L. Bian, J. Suo, G. Situ, G. Zheng, F. Chen und Q. Dai. „Content adaptive illumination for Fourier ptychography“. In: *Optics Express* 39.23 (Dez. 2014), S. 6648–6651. DOI: 10.1364/OL.39.006648.
- [Blu14] Bluetechnix Group GmbH. *ARGOS 3D - P100*. deutsch. Bluetechnix Group GmbH. 2014. URL: <http://www.bluetechnix.com/de/products/depthsensing/product/argos3d-p100/>.
- [Bon12] F. Bonarrigo, A. Signoroni und R. Leonardi. „Multi-view alignment with datadata of features for an improved usage of high-end 3D scanners“. In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* (Juli 2012), S. 148.1–148.24. DOI: 10.1186/1687-6180-2012-148.
- [Bon14] F. Bonarrigo, A. Signoroni und M. Botsch. „Deformable registration using patch-wise shape matching“. In: *Graphical Models* 76.5 (Sep. 2014). Geometric Modeling and Processing 2014, S. 554–565. ISSN: 1524-0703. DOI: 10.1016/j.gmod.2014.04.004.
- [BB10] C. Bräuer-Burchardt, C. Munkelt, M. Heinze, P. Kühmstedt und G. Notni. „Fringe Code reduction for 3D Measurement Systems Using Epipolar Geometry“. In: *Proceedings PCV - Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis*. Hrsg. von N. Paparoditis, M. Pierrot-Deseilligny, C. Mallet und O. Tournaire. Bd. 38. 3A. Sep. 2010, S. 192–197.
- [BB11b] C. Bräuer-Burchardt, P. Kühmstedt und G. Notni. „Error Compensation by Sensor Re-calibration in Fringe Projection Based Optical 3D Stereo Scanners“. In: *Image Analysis and Processing - ICIAP 2011*. Hrsg. von G. Maino und G. L. Foresti. Bd. 6979. 2. Ravenna, Italien: Springer, 2011, S. 363–373. ISBN: 978-3-642-24087-4. DOI: 10.1007/978-3-642-24088-1\_38.

- [BB14a] C. Bräuer-Burchardt, P. Kühmstedt und G. Notni. „Direkte Phasenentfaltung durch Geometriedatennutzung bei streifenprojektionsbasierten 3D Stereo-Sensoren“. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Bd. 13. Wichmann Verlag, Feb. 2014, S. 2–11.
- [Bro71] D. C. Brown. „Close-range camera calibration“. In: *Photogrammetric Engineering* 37.8 (1971), S. 855–866.
- [Brü11] M. Brückner, F. Bajramovic und J. Denzler. „Self-Calibration of Camera Networks: Active and Passive Methods“. In: *Emerging Topics in Computer Vision and its Applications*. Hrsg. von C. H. Chen. World Scientific Publishing, Dez. 2011, S. 447–469.
- [Cao14a] P. Cao, J. Xi, Y. Yu, Q. Guo und L. Song. „3D shape measurement based on projection of triangular patterns of two selected frequencies“. In: *Optics Express* 22.23 (Nov. 2014), S. 29234–29248. DOI: 10.1364/OE.22.029234.
- [Cao14b] P. Cao, J. Xi, Y. Yu und Q. Guo. „Digital Fringe Profilometry Based On Triangular Fringe Patterns and Spatial Shift Estimation“. In: *Proceedings SPIE: Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications III*. Hrsg. von K. G. Harding, T. Yoshizawa und S. Zhang. Bd. 9110. 2014, S. 91100C.1–91100C.15. DOI: 10.1117/12.2049791.
- [Cha09] W. Chang und M. Zwicker. „Range Scan Registration Using Reduced Deformable Models“. In: *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics 2009)* 28.2 (2009), S. 447–456. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2009.01384.x.
- [Che91] Y. Chen und G. Medioni. „Object modeling by registration of multiple range images“. In: *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Bd. 3. Apr. 1991, S. 2724–2729. DOI: 10.1109/ROBOT.1991.132043.
- [Col14] M. J. Collett und G. J. Tee. „Ellipse fitting for interferometry. Part 1: static methods“. In: *Journal of the Optical Society of America A* 31.12 (Nov. 2014), S. 2573–2583. DOI: 10.1364/AO.53.007697.
- [Con13] P. Cong, Z. Xiong, Y. Zhang, S. Zhao und F. Wu. „Dense single-shot 3D scanning via stereoscopic fringe analysis“. In: *IEEE International Conference on Image Processing*. Bd. 20. Sep. 2013, S. 3627–3631. DOI: 10.1109/ICIP.2013.6738748.
- [Dju03] I. Djurović und L. Stanković. „Adaptive Windowed Fourier Transform“. In: *Signal Processing* 82.1 (Jan. 2003), S. 775–784. DOI: 10.1016/S0165-1684(02)00380-8.
- [Don14] S. Dong, P. Nanda, R. Shiradkar, K. Guo und G. Zheng. „High-resolution fluorescence imaging via pattern-illuminated Fourier ptychography“. In: *Optics Express* 22.17 (Aug. 2014), S. 20856–20870. DOI: 10.1364/OE.22.020856.
- [Ett09] S. Ettl, O. J. Arold, P. M. Vogt, O. Hybl, Z. Yang, W. Xie und G. Häusler. „Flying Triangulation: A motion-robust optical 3D sensor principle“. In: *Fringe 2009: The 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology*. Hrsg. von W. Osten und M. Kujawinska. Bd. 6. Springer, 2009, S. 768–771. DOI: 10.1007/978-3-642-03051-2\_133.

- [Far92] C. T. Farrell und M. A. Player. „Phase step measurement and variable step algorithms in phase-shifting interferometry“. In: *Measurement Science and Technology* 3.10 (Juli 1992), S. 953–958. DOI: 10.1088/0957-0233/3/10/003.
- [Fre10] B. Freedman, A. Shpunt, M. Machline und Y. Arieli. „Depth mapping using projected patterns“. englisch. Pat. US 2010/0118123 A1. Mai 2010.
- [Gai09] S. Gai und F. Da. „A novel phase-shifting method based on strip marker“. In: *Optics and Lasers in Engineering* 48 (Mai 2009), S. 205–211. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.03.020.
- [Gal14] B. Galna, G. Barry, D. Jackson, D. Mhiripiri, P. Olivier und L. Rochester. „Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson’s disease“. In: *Gait & Posture* 39.4 (Apr. 2014), S. 1062–1068. ISSN: 0966-6362. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2014.01.008.
- [Gde06] M. A. Gdeisat, D. R. Burton und M. J. Lalor. „Spatial carrier fringe pattern demodulation by use of a two-dimensional continuous wavelet transform“. In: *Applied Optics* 45.34 (Dez. 2006), S. 8722–8732. DOI: 10.1364/AO.45.008722.
- [Gei12] A. Geiger, P. Lenz und R. Urtasun. „Are we ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite“. In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE, Juni 2012, S. 3354–3361. ISBN: 978-1-4673-1226-4. DOI: 10.1109/CVPR.2012.6248074.
- [Geo14] Geomagic GmbH. *Geomagic® Control™*. deutsch. Geomagic GmbH. 2014. URL: <http://geomagic.com/de/products/qualify/overview>.
- [Gor10] S. S. Gorthi und P. Rastogi. „Fringe Projection Techniques: Whither we are?“ In: *Optics and Lasers in Engineering* 48.2 (Feb. 2010), S. 133–140. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.09.001.
- [Gro11] M. Grosse, M. Schaffer, B. Harendt und R. Kowarschik. „Fast data acquisition for three-dimensional shape measurement using fixed-pattern projection and temporal coding“. In: *Optical Engineering* 50.10 (Okt. 2011), S. 100503–100503–3. DOI: 10.1117/1.3646100.
- [Gua03a] C. Guan, L. G. Hassebrook und D. L. Lau. „Composite structured light pattern for three-dimensional video“. In: *Optics Express* 11.5 (März 2003), S. 406–417. DOI: 10.1364/OE.11.000406.
- [Gua03b] C. Guan, L. G. Hassebrook und D. L. Lau. „Real-time 3-D Data Acquisition for Augmented Reality Man and Machine Interfacing“. In: *Geo-Spatial and Temporal Image and Data Exploitation* 5097.3 (2003), S. 40–47. DOI: 10.1117/12.487276.
- [Gum08] S. Gumhold und S. König. „Image-Based Motion Compensation for Structured Light Scanning of Dynamic Surfaces“. In: *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications* 5.3/4 (Nov. 2008), S. 434–441. ISSN: 1740-8865. DOI: 10.1504/IJISTA.2008.021306.
- [Guo09] H. Guo. „3-D Shape Measurement Based on Fourier Transform and Phase Shifting Method“. Dissertation. Stony Brook University, Dez. 2009.

- [Guo08] H. Guo und P. S. Huang. „3-D shape measurement by use of a modified Fourier transform method“. In: *Proceedings SPIE*. Bd. 7066. Aug. 2008, 70660E.1–70660E.8. DOI: 10.1117/12.798170.
- [HH01] O. A. Hall-Holt und S. Rusinkiewicz. „Stripe Boundary Codes for Real-Time Structured-Light Range Scanning of Moving Objects“. In: *International Conference on Computer Vision*. Bd. 2. 8. IEEE, Juli 2001, S. 359–366. ISBN: 0-7695-1143-0. DOI: 10.1109/ICCV.2001.937648.
- [Ham77] R. W. Hamming. *Digital Filters*. Bd. 3. Prentice-Hall Signal Processing Series. Prentice-Hall, 1977. ISBN: 9780132125710.
- [Har14] Harder & Steenbeck GmbH & Co. KG. *PRO-COLOR – Airbrush-Acrylfarben*. deutsch. Harder & Steenbeck GmbH & Co. KG. 2014. URL: <http://www.harder-airbrush.de/procolor>.
- [Har13] B. Harendt, M. Große, M. Schaffer und R. Kowarschik. „Adaptive raumzeitliche Korrelation zur 3D-Vermessung dynamischer Szenen“. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Bd. 12. Wichmann Verlag, Feb. 2013, S. 96–103.
- [Har14a] B. Harendt, M. Große, M. Schaffer und R. Kowarschik. „3D-Oberflächenvermessung von Szenen mit statischen und bewegten Objekten mithilfe adaptiver raumzeitlicher Korrelation“. In: *DGaO Proceedings*. Bd. 115. 2014, A7.
- [Har14b] B. Harendt, M. Große, M. Schaffer und R. Kowarschik. „3D shape measurement of static and moving objects with adaptive spatiotemporal correlation“. In: *Applied Optics* 53.31 (Nov. 2014), S. 7507–7515. DOI: 10.1364/AO.53.007507.
- [Har78] F. J. Harris. „On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform“. In: *Proceedings of the IEEE* 66.1 (Jan. 1978), S. 51–83. ISSN: 0018-9219. DOI: 10.1109/PROC.1978.10837.
- [Har04] R. Hartley und A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2. Aufl. Cambridge University Press, März 2004. ISBN: 0521540518.
- [Hec08] C. Heckenkamp. *Grundlagen der Bildverarbeitung: Das PMD-Prinzip*. Whitepaper. inspect, März 2008.
- [Hei27] W. Heisenberg. „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“. German. In: *Zeitschrift für Physik* 43.3-4 (1927), S. 172–198. ISSN: 0044-3328. DOI: 10.1007/BF01397280.
- [Hei14] S. Heist, A. Mann, P. Kühmstedt, P. Schreiber und G. Notni. „Array-projected aperiodic sinusoidal fringes for high-speed 3-D shape measurement“. In: *Proceedings of SPIE*. Hrsg. von K. G. Harding und T. Yoshizawa. Bd. 9110. Mai 2014, S. 91100D–91100D–12. DOI: 10.1117/12.2050410.
- [Her02] M. A. Herráez, D. R. Burton, M. J. Lalor und M. A. Gdeisat. „Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path“. In: *Applied Optics* 41.35 (Dez. 2002), S. 7437–7444. DOI: 10.1364/AO.41.007437.

- [Hew79] E. Hewitt und R. E. Hewitt. „The Gibbs-Wilbraham phenomenon: An episode in fourier analysis“. In: *Archive for History of Exact Sciences* 21.2 (1979), S. 129–160. ISSN: 0003-9519. DOI: 10.1007/BF00330404.
- [HOL14a] HOLOEYE Photonics AG. *HED 7200 Color LCOS Microdisplay*. englisch. 2014. URL: <http://holoeYE.com/lcos-microdisplays/hed-7200-color-lcos/>.
- [HOL14b] HOLOEYE Photonics AG. *LC-R 720 Spatial Light Modulator (Reflective)*. englisch. HOLOEYE Photonics AG. Sep. 2014. URL: [http://holoeYE.com/spatial-light-modulators/lc-r720\\_spatial\\_light\\_modulator/](http://holoeYE.com/spatial-light-modulators/lc-r720_spatial_light_modulator/).
- [Hu03] Q. Hu, P. S. Huang, Q. Fu und F.-P. Chiang. „Calibration of a three-dimensional shape measurement system“. In: *Optical Engineering* 42.2 (Jan. 2003), S. 487–493. DOI: 10.1117/1.1531977.
- [Hua10] L. Huang, Q. Kemao, B. Pan und K. Asundi. „Comparison of Fourier Transform, windowed Fourier Transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry“. In: *Optics and Lasers in Engineering* 48.2 (Feb. 2010), S. 141–148. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.04.003.
- [Hua98] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung und H. H. Liu. „The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis“. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 454.1971 (1998), S. 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193.
- [Hua05] N. E. Huang und S. S. P. Shen. *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*. World Scientific Publishing, 2005. ISBN: 981-256-376-8.
- [Hua99] P. S. Huang, Q. Hu, F. Jin und F.-P. Chiang. „Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring“. In: *Optical Engineering* 38.6 (Juni 1999), S. 1065–1071. DOI: 10.1117/1.602151.
- [Hua02] P. S. Huang, C. Zhang und F.-P. Chiang. „High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection“. In: *Optical Engineering* 42.1 (Dez. 2002), S. 163–168. DOI: 10.1117/1.1525272.
- [Hua14] Z. Huang, J. Xi, Y. Yu, Q. Guo und L. Song. „Improved geometrical model of fringe projection profilometry“. In: *Optics Express* 22.26 (Dez. 2014), S. 32220–32232. DOI: 10.1364/OE.22.032220.
- [Ima14] Imaging Solutions GmbH. *Motion Pro Y Serie*. deutsch. Imaging Solutions GmbH. 2014. URL: <http://www.imaging-solutions.de/Y.html>.
- [Kho12] K. Khoshelham und S. O. Elberink. „Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications“. In: *Sensors* 2012. Bd. 12. 2012, S. 1437–1454. DOI: 10.3390/s120201437.
- [Kra75] E. F. Krause. *Taxicab Geometry: An Adventure in Non-Euclidean Geometry*. 1. Aufl. Dover Publications, 1975. ISBN: 978-0486252025.
- [Kre96] T. Kreis. *Holographic Interferometry: Principles and Methods*. Hrsg. von W. Jüptner und W. Osten. Bd. 1. Akademie Verlag, 1996.



- [Küh97] P. Kühmstedt. „Verfahren zum Bestimmen von dreidimensionalen Oberflächen“. deutsch. Pat. DE19720160C2 (07747 Jena). Mai 1997.
- [Küh08] P. Kühmstedt und J. Hintersehr. „Optische 3D-Messtechnik im Dentalbereich“. In: *DIGITAL\_DENTAL.NEWS* 2 (Sep. 2008), S. 40–45.
- [Lau13] D. Lau. *The Science Behind Kinects or Kinect 1.0 versus 2.0*. englisch. Nov. 2013. URL: [http://gamasutra.com/blogs/DanielLau/20131127/205820/The\\_Science\\_Behind\\_Kinects\\_or\\_Kinect\\_10\\_versus\\_20.php](http://gamasutra.com/blogs/DanielLau/20131127/205820/The_Science_Behind_Kinects_or_Kinect_10_versus_20.php).
- [Lee04] J.-M. Lee, S. H. Kim, D. P. Jang, T. H. Ha, J.-J. Kim, I. Y. Kim, J. S. Kwon und S. I. Kim. „Deformable model with surface registration for hippocampal shape deformity analysis in schizophrenia“. In: *NeuroImage* 22.2 (Juni 2004), S. 831–840. ISSN: 1053-8119. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2004.02.004.
- [Liu07] J. Liu. „Deformable Model-Based Image Registration“. English. In: *Deformable Models*. Topics in Biomedical Engineering. International Book Series. Springer New York, 2007, S. 517–541. ISBN: 978-0-387-31201-9. DOI: 10.1007/978-0-387-68413-0\_15.
- [Loh14a] W. Lohry, V. Chen und S. Zhang. „Absolute three-dimensional shape measurement using coded fringe patterns with phase unwrapping or projector calibration“. In: *Optics Express* 22.2 (Jan. 2014), S. 1287–1301. DOI: 10.1364/OE.22.001287.
- [Loh14b] W. Lohry und S. Zhang. „High-speed absolute three-dimensional shape measurement using three binary dithered patterns“. In: *Optics Express* 22.20 (Nov. 2014), S. 26752–26762. DOI: 10.1364/OE.22.026752.
- [Luh00] T. Luhmann. *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 1. Aufl. Oldenburg: Herbert Wichmann Verlag, 2000. ISBN: 3-87907-321-X.
- [Lut13] P. Lutzke, M. Schaffer, P. Kühmstedt, R. Kowarschik und G. Notni. „Experimental comparison of phase-shifting fringe projection and statistical pattern projection for active triangulation systems“. In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*. Bd. 8788. 2013, S. 878813–878813–7. DOI: 10.1117/12.2020910.
- [Man12] Mantis Vision. *Mantis Vision's F5 Series*. englisch. 2012. URL: <http://www.mv4d.com/f5/>.
- [Mic14] Microsoft Cooperation. *Kinect für Xbox 360*. Microsoft. 2014. URL: <http://www.xbox.com/kinect/>.
- [Mül14] E. Müller. „Dreidimensionale Objektvermessung aus Streifenbildern eines Zeitpunktes basierend auf Verstetigung mithilfe von Segmentvergleichen“. Masterarbeit. Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Sep. 2014.
- [Mun11] C. Munkelt. „Aktive daten- und modellbasierte Sensorpositionierung zur 3-D Vermessung“. Dissertation. Friedrich-Schiller-Universität Jena, Okt. 2011.
- [MM14] J. Muñoz-Maciel, F. J. Casillas-Rodríguez, F. G. Peña-Lecona, V. M. Duran-Ramírez, M. Mora-Gonzales und J. G. Rodríguez-Zavala. „Phase recovery from interferograms under high amplitude vibrations“. In: *Optics Express* 22.25 (Dez. 2014), S. 31387–31395. DOI: 10.1364/OE.22.031387.
- [Ngu15] H. Nguyen, D. Nguyen, Z. Wang, H. Kieu und M. Le. „Real-time, high-accuracy 3D imaging and shape measurement“. In: *Applied Optics* 54.1 (Jan. 2015), A9–A17. DOI: 10.1364/AO.54.0000A9.

- [Not07] G. Notni. „Verfahren zur optischen 3-D-Messtechnik“. In: *Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung: Qualitätssicherung in der Praxis*. Hrsg. von N. Bauer. Fraunhofer IRB Verlag, 2007, S. 214–232. ISBN: 3-8167-7386-9.
- [Not93] G. Notni, R. Schenderlein und L. Wenke. „Ellipse Fitting Technique for Phase Shifter Calibration - an Error Analysis“. In: *Fringe '93: Proceedings of the 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns*. Hrsg. von W. Jüptner und W. Osten. 19. Okt. 1993, S. 91–96. ISBN: 3055016122.
- [Not06] G. Notni, P. Kühmstedt, M. Heinze, C. Munkelt und M. Himmelreich. „Self calibrating fringe projection setups for industrial use“. In: *Fringe 2005, The 5th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns*. Hrsg. von W. Osten. Bd. 5. Springer, 2006, S. 436–441. DOI: 10.1007/3-540-29303-5\_57.
- [odo14] odos imaging ltd. *real.iZ-1K vision system*. englisch. odos imaging ltd. Nov. 2014. URL: <http://www.odos-imaging.com/view.php/page/p-realiz-1K>.
- [Oni02] A. L. Onishchik. „Hermitian Matrix“. In: *Encyclopaedia of Mathematics*. Hrsg. von M. Hazewinkel. Springer-Verlag, 2002. ISBN: 1-4020-0609-8.
- [Pap96] D. V. Papadimitriou und T. J. Dennis. „Epipolar line estimation and rectification for stereo image pairs“. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 5.4 (Apr. 1996), S. 672–676. ISSN: 1057-7149. DOI: 10.1109/83.491345.
- [PCO14] PCO AG. *pco.dimax HS4*. deutsch. PCO AG. 2014. URL: <http://www.pco.de/de/highspeed-kameras/pcodimax-hs/>.
- [Pez12] N. Pezzotti, F. Bonarrigo und A. Signoroni. „Boosting the computational performance of feature-based multiple 3D scan alignment by iat-k-means clustering“. In: *Second Joint 3DIM/3DPVT Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission*. Zürich: IEEE, Okt. 2012, S. 89–96. ISBN: 978-1-4673-4470-8. DOI: 10.1109/3DIMPVT.2012.32.
- [Pho14] Photron USA Incorporated. *Photron FASTCAM SA-Z*. englisch. Photron USA Incorporated. 2014. URL: [http://www.photron.com/?cmd=product\\_general&product\\_id=41&product\\_name=FASTCAM+SA-Z](http://www.photron.com/?cmd=product_general&product_id=41&product_name=FASTCAM+SA-Z).
- [pmd14] pmdtechnologies GmbH. *pmd[vision]<sup>®</sup> CamCube 3.0*. englisch. pmdtechnologies GmbH. 2014. URL: [http://www.pmdtec.com/news\\_media/video/camcube.php](http://www.pmdtec.com/news_media/video/camcube.php).
- [Pul99] K. Pulli. „Multiview Registration for Large Data Sets“. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. 3DIM'99. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1999, S. 160–168. ISBN: 0-7695-0062-5. DOI: 10.1109/IM.1999.805346.
- [Qui95] J. A. Quiroga, A. González-Cano und E. Bernabeu. „Phase-unwrapping algorithm based on an adaptive criterion“. In: *Applied Optics* 34.14 (Mai 1995), S. 2560–2563. DOI: 10.1364/AO.34.002560.
- [Rus01] S. Rusinkiewicz und M. Levoy. „Efficient Variants of the ICP Algorithm“. In: *3DIM*. IEEE Computer Society, 2001, S. 145–152. ISBN: 0-7695-0984-3.

- [Rus02] S. Rusinkiewicz, O. Hall-Holt und M. Levoy. „Real-Time 3D Model Acquisition“. In: *ACM Transactions on Graphics* 21.3 (Juli 2002), S. 438–446. DOI: 10.1145/566570.566600.
- [Sak13] H. Sakuma. „Improvement of One-shot Fringe Projection for Shape Measurement“. In: *The SIJ Transactions on Computer Science Engineering and its Applications (CSEA)* 1.4 (Okt. 2013), S. 149–153. ISSN: 2321-2381.
- [Sch10] M. Schaffer, M. Grosse und R. Kowarschik. „High-speed pattern projection for three-dimensional shape measurement using laser speckles“. In: *Applied Optics* 49.18 (Juni 2010), S. 3622–3629. DOI: 10.1364/AO.49.003622.
- [Sch11a] M. Schaffer, M. Grosse, B. Harendt und R. Kowarschik. „High-speed three-dimensional shape measurements of objects with laser speckles and acousto-optical deflection“. In: *Optics Letters* 36.16 (Aug. 2011), S. 3097–3099. DOI: 10.1364/OL.36.003097.
- [Sch11b] C. Schaller. „Time-of-Flight - A New Modality for Radiotherapy“. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, März 2011.
- [Sch00] W. Schreiber und G. Notni. „Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique“. In: *Optical Engineering* 39 (2000), S. 159–169.
- [Sch12] M. Schröter, F. Willomitzer, O. J. Arold, S. Ettl und G. Häusler. „Calibration of the optical 3D sensor "Flying Triangulation"“. In: *DGaO Proceedings*. Bd. 113. Eindhoven, 2012, P25.
- [Sie10] M. Sieler, P. Schreiber, P. Dannberg und A. Bräuer. „Array projection optics: multi-channel design for ultra slim projectors“. In: *Proceedings of SPIE*. Hrsg. von H. Thienpont, P. V. Daele, J. Mohr und H. Zappe. Bd. 7716. Apr. 2010, 77161A–77161A–10. DOI: 10.1117/12.854457.
- [Sie12] M. Sieler, P. Schreiber, P. Dannberg, A. Bräuer und A. Tünnermann. „Ultraslim fixed pattern projectors with inherent homogenization of illumination“. In: *Applied Optics* 51.1 (Jan. 2012), S. 64–74. DOI: 10.1364/AO.51.000064.
- [Smi07] W. J. Smith. *Modern Optical Engineering*. 4. Aufl. Bd. PM180. SPIE Press, Dez. 2007. ISBN: 9780819470966.
- [Su09] X. Su und Q. Zhang. „Dynamic 3-D shape measurement method: A review“. In: *Optics and Lasers in Engineering* 48 (Mai 2009), S. 191–204. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.03.012.
- [Tak83] M. Takeda und K. Mutoh. „Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes“. In: *Applied Optics* 22.24 (Dez. 1983), S. 3977–3982. DOI: 10.1364/AO.22.003977.
- [Tex13a] Texas Instruments Incorporated. *DLP5500 - 0.55 XGA DMD*. englisch. Texas Instruments Incorporated. Sep. 2013. URL: <http://www.ti.com/product/DLP5500>.
- [Tex13b] Texas Instruments Incorporated. *DLP7000 - 0.7 XGA 2xLVDS Type-A DMD*. englisch. Texas Instruments Incorporated. Juni 2013. URL: <http://www.ti.com/product/DLP7000>.

- [Tex14] Texas Instruments Incorporated. *DLP9000FLS 0.9 WQXGA MVSP Type A DMD*. englisch. Texas Instruments Incorporated. Dez. 2014. URL: <http://www.ti.com/product/DLP9000>.
- [Tön05] K. D. Tönnies. *Grundlagen der Bildverarbeitung*. Hrsg. von I. Schneider und R. Fuchs. Bd. 1. Pearson Studium, Apr. 2005. ISBN: 3-8273-7155-4.
- [Tru13] M. Trusiak, K. Patorski und K. Pokorski. „Hilbert-Huang processing for single-exposure two-dimensional grating interferometry“. In: *Optics Express* 21.23 (Nov. 2013), S. 28359–28379. DOI: 10.1364/OE.21.028359.
- [Vis13] Vision Raytracer Pty. Ltd. *POV-Ray - The Persistence of Vision Raytracer*. Englisch. Vision Raytracer Pty. Ltd. Aug. 2013. URL: <http://www.povray.org/>.
- [Vis14] Vision Research Incorporated. *Phantom v2511*. englisch. Vision Research Incorporated. Juli 2014. URL: <http://www.visionresearch.com/Products/High-Speed-Cameras/v2511/>.
- [Wan12] C. Wang und F. Da. „Phase demodulation using adaptive windowed Fourier transform based on Hilbert-Huang transform“. In: *Optics Express* 20.6 (Juli 2012), S. 18459–18477. DOI: 10.1364/OE.20.018459.
- [Wat14] L. R. Watkins und M. J. Collett. „Ellipse fitting for interferometry. Part 2: experimental realization“. In: *Applied Optics* 53.32 (Nov. 2014), S. 7697–7703. DOI: 10.1364/AO.53.007697.
- [Wei71] S. B. Weinstein und P. M. Ebert. „Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform“. In: *IEEE Transactions on Communication Technology* 19.5 (Okt. 1971), S. 628–634. ISSN: 0018-9332. DOI: 10.1109/TCOM.1971.1090705.
- [Wei07] T. Weise, B. Leibe und L. J. V. Gool. „Fast 3D Scanning with Automatic Motion Compensation“. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE Computer Society, Juni 2007, S. 1–8. ISBN: 1-4244-1179-3. DOI: 10.1109/CVPR.2007.383291.
- [Wie06] A. Wiegmann, H. Wagner und R. Kowarschik. „Human face measurement by projecting bandlimited random patterns“. In: *Optics Express* 14.17 (Aug. 2006), S. 7692–7698. DOI: 10.1364/OE.14.007692.
- [Wil11] F. Willomitzer, O. J. Arold, F. Huber, S. Ettl und G. Häusler. „Options and limitations of "Flying Triangulation"“. In: *DGaO Proceedings*. Bd. 112. 2011, P29.
- [Win06] S. Winkelbach. „Das 3d-Puzzle-Problem: Effiziente Methoden zum paarweisen Zusammensetzen von dreidimensionalen Fragmenten“. Diss. Technische Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig, Sep. 2006.
- [Yan07] F. Yang und X. He. „Two-step phase-shifting fringe projection profilometry: intensity derivative approach“. In: *Applied Optics* 46.29 (Okt. 2007), S. 7172–7178. DOI: 10.1364/AO.46.007172.
- [Zap12] E. Zappa und G. Busca. „Static and dynamic features of Fourier transform profilometry: A review“. In: *Optics and Lasers in Engineering* 50 (März 2012), S. 1140–1151. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.03.008.

- [Zha14a] Q. Zhang, Z. Hou, X. Wang und X. Li. „Dynamic 3D Shape Measurement Based on Grating projection and Fourier Fringe Analysis“. In: *Proceedings SPIE: Optical Metrology and Inspection Applications III*. Hrsg. von S. Han, T. Yoshizawa und S. Zhang. Bd. 9276. 2014, 92760N.1–92760N.6. DOI: 10.1117/12.2071519.
- [Zha10] S. Zhang. „Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques“. In: *Optics and Lasers in Engineering* 48.2 (Feb. 2010), S. 149–158. ISSN: 0143-8166. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.03.008.
- [Zha06a] S. Zhang und S.-T. Yau. „High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-stepping method“. In: *Optics Express* 14.7 (März 2006), S. 2644–2649.
- [Zha06b] S. Zhang und P. S. Huang. „High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement“. In: *Optical Engineering* 45.12 (Dez. 2006), S. 123601–123601–8. DOI: 10.1117/1.2402128.
- [Zha14b] W. Zhang, X. Lu, L. Fei, H. Zhao, H. Wang und L. Zhong. „Simultaneous phase-shifting dual-wavelength interferometry based on two-step demodulation algorithm“. In: *Optics Letters* 39.18 (Sep. 2014), S. 5375–5378. DOI: 10.1364/OL.39.005375.
- [Zha12] Z. H. Zhang. „Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques“. In: *Optics and Lasers in Engineering* 50.8 (Aug. 2012), S. 1097–1106. ISSN: 0143-8166. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.01.007.
- [Zha94] Z. Zhang. „Iterative Point Matching for Registration of Free-form Curves and Surfaces“. In: *International Journal of Computer Vision* 13.2 (Okt. 1994), S. 119–152. ISSN: 0920-5691. DOI: 10.1007/BF01427149.
- [Zha00] Z. Zhang. „A Flexible New Technique for Camera Calibration“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22.11 (2000). MSR-TR-98-71, S. 1330–1334.
- [Zhe13] G. Zheng, R. Horstmeyer und C. Yang. „Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy“. In: *Nature Photonics* 7 (Juli 2013), S. 739–745. DOI: 10.1038/nphoton.2013.187.
- [Zho04] J. Zhong und J. Weng. „Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry“. In: *Applied Optics* 43.26 (Sep. 2004), S. 4993–4998. DOI: 10.1364/AO.43.004993.
- [Zho07] J. Zhong und H. Zeng. „Multiscale windowed Fourier transform for phase extraction of fringe patterns“. In: *Applied Optics* 46.14 (Mai 2007), S. 2670–2675. DOI: 10.1364/AO.46.002670.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Veränderliche Abbildung identischer 3D-Objektpunkte bei relativer Bewegung zwischen Messobjekt und 3D-Sensor . . . . .	2
1.2	Veranschaulichung der Schwarz-Weiß-Codierung einer siebenstufigen Gray-Code-Sequenz . . . . .	3
1.3	Zweidimensionaler Suchraum für Punktkorrespondenzen durch a priori unbekannte Messobjektlage . . . . .	4
1.4	Komponenten und Grundanordnung des als 3D-Sensor bezeichneten Messsystems, bestehend aus zwei Kameras und einem mittig positionierten Projektionssystem . . . . .	5
2.1	Übersicht von Methoden zur Verringerung von $T_{\text{Seq}}$ . . . . .	9
2.2	Suchraumverringern durch Kenntnis der Systemkalibrierung . . . . .	12
2.3	Verkürzung der Epipolarlinie durch apriorische Kenntnisse . . . . .	13
2.4	Art und Vorgehen der Zusammensetzung sogenannter Vereinigungsmuster. . . . .	16
2.5	Beispiel eines vierstufigen Streifenübergangscodes . . . . .	17
2.6	Gliederungsebenen und Strahlengänge eines Arrayprojektionssystems . . . . .	21
2.7	Alternative Musterstrukturen als temporäre Objekttextur . . . . .	22
3.1	Flussdiagramm notwendiger Arbeitsschritte des dieser Arbeit zugrundeliegenden Verfahrens der Bewegungskompensation im dreidimensionalen Raum . . . . .	27
3.2	3D-Koordinatenbestimmung durch Einzelbildanalyse mit Fouriertransformation: Systemanordnung und Frequenzfilterung . . . . .	31
3.3	Stereokamerabasierte Suche nach 2D-Punktkorrespondenzen unter Verwendung temporärer Streifenprojektion in $(1 + \cos)$ -Form, sowie Epipolargeometrie zur Suchraumeinschränkung auf eine Dimension . . . . .	32
3.4	Flussdiagramm zum Vorgehen bei der Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten aus zwei Kamerabildern eines Aufnahmezeitpunktes . . . . .	33
3.5	Frequenzfilterung bei Ausführung der Stereo-Single-Shot-Analyse (SSSA) . . . . .	34
3.6	Temporäre Objektmarkierung durch einseitig geöffneten Rechteckmarker zur Bereitstellung einer definierten 2D-Punktkorrespondenz . . . . .	36
3.7	Ermittlung einer 2D-Punktkorrespondenz basierend auf Korrespondenzkandidaten und Pixelüberlappungen des jeweils betrachteten Segments . . . . .	39
3.8	Schema der Bildunterteilung für eine einfache, fensterbasierte Frequenzfilterung (2D-WFT) inklusive überlappender Fensterverschiebung . . . . .	41
3.9	Zwei 3D-Punktwolken des Messobjektes „geometrische Formen“ . . . . .	43
3.10	Grafische Bestimmung des globalen Phasenschubs $\Delta\phi_{R_n}$ zwischen zwei Interferogrammen . . . . .	46
3.11	Visualisierung lokaler Änderungen des Phasenschubs $\Delta\phi_{R_n}$ zwischen zwei Zeitpunkten bei gleichbleibender Musterprojektion . . . . .	47



3.12	Variable Objektbeleuchtung und Projektionsmodulation am Beispiel eines sich um die XZ-Achse drehenden prismatischen Messkörpers . . . . .	48
3.13	Einfluss und Korrekturmöglichkeit von Schattenwurf sekundärer Objekte . . . .	51
3.14	Einfluss verschiedener Unschärfeparameter auf die Abbildung von $(1 + \cos)$ -Musterstrukturen . . . . .	53
4.1	Unterschiedliche Zuordnung von 3D-Objektpunkten und 2D-Bildkoordinaten bei Anwendung von 3D-Rückprojektion und Raytracing-Verfahren . . . . .	58
4.2	Beispielhafte Veranschaulichung verwendeter Messobjekte zur Erzeugung synthetischer Bilddaten . . . . .	60
4.3	Vergleich zwischen ein- und zweidimensionaler Bildanalyse zur 3D-Objektkoordinatenbestimmung aus Bilddaten eines Aufnahmezeitpunktes: „1D-FT“ im Vergleich zu „2D-FT“ . . . . .	62
4.4	Defizite in Form von Wellenbildungen einer globalen, zweidimensionalen Frequenzfilterung am Beispiel des prismatischen Messkörpers . . . . .	64
4.5	Vergleich zweidimensionaler Teilbildanalysen auf Fensterbasis zur 3D-Objektkoordinatenbestimmung aus Bilddaten eines Aufnahmezeitpunktes: „2D-AWFT“ im Vergleich zu „2D-AWFT“ und „2D-WFT“ . . . . .	66
4.6	Minimierung von Wellenstrukturen innerhalb des 3D-Ergebnisses für das Messobjekt Prisma . . . . .	67
4.7	Verteilung von 3D-Fehlern $\epsilon^{3D}$ auf dem Messobjekt Prisma bei Verwendung verschiedener, fensterbasierter Verfahren zur Feinphasenbestimmung . . . . .	68
4.8	3D-Standardabweichungen und Eindeutigkeitswerte für verschiedene Triangulationswinkel $\zeta_{KP}$ zwischen Projektionssystem und der nächstgelegenen Kamera .	69
4.9	Einfluss der Bewegungsgröße auf die Genauigkeit der dreidimensionalen Bewegungsschätzung unter Anwendung des ICP-Algorithmus der <code>libicp</code> -Bibliothek	71
4.10	Visualisierung der Intensitätsbilder $I_n^c$ nach Elimination der Trägerfrequenzen und ihrer Vielfachen im Spektralbereich von $Q_1$ bis $Q_n$ . . . . .	74
4.11	Sequenz von mit $\Delta\phi_{R_n} = 90^\circ$ phasenverschobenen $(1 + \cos)$ -Intensitätsbildern mit paarweise, um jeweils ein Zehntel der Bildbreite verschobener Randabdunklung von maximal 98 Prozent. . . . .	75
4.12	Betragsmäßige Abweichungen in der Bestimmung von Rohphasen $\phi_{rel}$ (a) bei Annahme konstanter Helligkeitsverteilungen während $T_{Seq}$ , sowie (b) mit datengetriebener Berechnung lokaler Beleuchtungsparameter . . . . .	76
4.13	Ergebnisdarstellung von Rohphasenkarten $\phi_{rel}$ bei Annahme konstanter Beleuchtungsparameter über die Zeitspanne der vollständigen Messsequenz $T_{Seq}$ , auf der Grundlage bewegungskompensierter Intensitätsbilder $\bar{I}$ . . . . .	77
4.14	Lokale Beleuchtungsbestimmung basierend auf $(\bar{I}_n^c(x, y), \Delta\phi_{R_n}^c(x, y))$ -Tupeln einer quadratischen Umgebung jedes Bildpunktes $(x, y)$ . . . . .	78
4.15	Unterschiede in der Bildpunktumgebung zwischen quadratischer Festlegung und adaptiver Determinierung, sowie die Rohphasenkarte $\phi_{rel}^{c1}$ bei lokaler Beleuchtungsbestimmung mit adaptiver Größe der Bildpunktumgebung . . . . .	79
4.16	Abweichungen der Rohphasenwerte $\phi_{rel}$ entlang einer ausgewählten Strecke gegenüber der Ground-Truth-Phasenverteilung . . . . .	80
4.17	Durch Schattenwurf sekundärer Objekte induzierte Rohphasenfehler . . . . .	81

4.18	Propagation von 3D-Standardabweichungen über eine Messsequenz der Länge $N = 8$ . . . . .	83
4.19	Einfluss von Fehlern in der Bewegungsschätzung auf die Ermittlung von Feinphasen über eine Messsequenz der Länge $N = 8$ . . . . .	86
4.20	Einfluss von Intensitätsrauschen auf die 3D-Standardabweichung und Vollständigkeit der triangulationsbasierten Auswertung von Interferogrammen eines Aufnahmezeitpunktes. . . . .	87
4.21	Definition und Einfluss des maximalen Oberflächengradienten beziehungsweise Winkels zwischen 3D-Sensor und Messobjektoberfläche auf die 3D-Standardabweichung, sowie Vollständigkeit der triangulationsbasierten Auswertung von Interferogrammen eines Aufnahmezeitpunktes . . . . .	89
4.22	3D-Fehlerverteilungen des Messobjektes Halbkugel bei Anwendung der Verfahren VV2 respektive VV3 . . . . .	94
5.1	Tischdigitalisierer „hiScanp“ zur dreidimensionalen Objektvermessung, sowie das Messobjekt „geometrische Formen“ mit aktiver Gray-Code-Temporärtextur . . .	97
5.2	Zur Auswertung von Einzelaufnahmezeitpunkten sowie zur 3D-Bewegungskompensation verwendete Messobjekte . . . . .	100
5.3	Bewegungsräume des 3D-Messsystems „hiScanp“ . . . . .	101
5.4	Untergliederung sowie 3D-Fehlerverteilung eines Aufnahmezeitpunktes des Messobjektes „geometrische Formen“ . . . . .	103
5.5	Farbcodierte Bildsegmentierung auf Datenbasis von Grauwert-Interferogrammen eines Aufnahmezeitpunktes des 3D-Messsystems „hiScanp“ . . . . .	105
5.6	3D-Fehlerverteilungen für die „hiScanp“-Messobjekte „kleine Kugel“ und „kleines Prisma“ bei Stereo-Single-Shot-Auswertung und unter Verwendung von Segmentkarten zur $2\pi$ -Phasenverstetigung . . . . .	105
5.7	Farbcodierte Segmentierung des Messobjektes „geometrische Formen“, sowie 3D-Fehlerverteilung des Bereiches B4 bei korrekter $2\pi$ -Phasenverstetigung . . . . .	106
5.8	Prozentuale Abweichungen ermittelter Bewegungsgrößen zwischen 3D-Punktwolken je zwei aufeinander folgender Aufnahmezeitpunkte gegenüber der systeminduzierten Ground-Truth-Rotationsbewegung . . . . .	108
5.9	3D-Standardabweichungen zwischen bewegungskompensierten 3D-Punktwolken und dreiecksbasierten Oberflächenrepräsentationen des jeweiligen Messobjektes als vereinigttes Resultat von zwölf Messpositionen und jeweiliger Verwendung einer vollständigen Mustersequenz . . . . .	110
5.10	Visualisierung von 3D-Fehlerverteilungen und dreiecksbasierten Oberflächenrekonstruktionen für eine Sequenzlänge von $N = 8$ ( $1 + \cos$ )-Intensitätsverteilungen .	111
A.1	Einfluss der Bildsegmentierung auf die Frequenzanalyse von Streifenlichtbilder in ( $1 + \cos$ )-Form . . . . .	118
A.2	3D-Fehlerverteilungen des Messobjektes Prisma bei Anwendung der Verfahren VV2 respektive VV3. . . . .	118
A.3	Visualisierung der Intensitätsbilder $I_n^c$ nach Elimination der Trägerfrequenzen und ihrer Vielfachen im Spektralbereich von $Q_1$ bis $Q_n$ bei Projektion von 64 respektive 32 ( $1 + \cos$ )-Perioden . . . . .	119

A.4	Frequenzspektren der Messobjekte Halbkugel und Prisma für die Musterprojektion verschiedener $(1 + \cos)$ -Periodenanzahl . . . . .	120
-----	--	-----

# Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht über Vor- und Nachteile von Verfahren zur Reduktion der Anzahl an Musterprojektionen. . . . .	18
2.3	Beispielhafte Hochgeschwindigkeitskameras mit jeweiligem Zusammenhang von Bildpunktanzahl $px$ und Bildaufnahmezeit $fps$ . . . . .	19
3.1	Parametereinfluss einer Unschärfesimulation durch Glättung mithilfe eines Gauß-filters auf eine $(1 + \cos)$ -Intensitätsverteilung . . . . .	53
3.2	Sensor- und Systemparameter zur Bestimmung der Bewegungsunschärfe . . . . .	54
4.1	System- und Komponentenparameter für die Versuchsdurchführung basierend auf synthetischen Daten. . . . .	60
4.2	Eigenschaften verschiedener Verfahren zur Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten auf Datenbasis eines Aufnahmezeitpunktes. . . . .	61
4.3	2D-WFT: Fenstergrößen und -verschiebungen für verschiedene, quadratische Bildauflösungen . . . . .	65
4.4	Betragsmäßig maximale und mittlere Abweichungen zwischen der Berechnung von Helligkeitsverteilungen durch Fourieranalyse von Interferogrammen und den als Ground-Truth gegebenen Hellbildern der Messobjekte Halbkugel und Prisma . . . . .	75
4.5	Abweichungen der Rohphasenverteilung bei Verwendung einer quadratischen, $7 \times 7$ Pixel und $31 \times 31$ Pixel, sowie einer Bildpunktumgebung mit adaptiver Größe zur lokalen Beleuchtungsbestimmung. . . . .	79
4.6	Zuordnungstabelle verwendeter RMS-Rauschlevel zu maximalen Amplituden der Grauwertverteilung . . . . .	87
4.7	Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten eines Messobjektes: Statisches Messsetup, Einzelzeitpunktauswertung, vollautomatisches Zusammensetzen und 3D-Bewegungskompensation . . . . .	94
5.1	System- und Komponentenparameter des 3D-Tischdigitalisierers „hiScanp“. . . . .	98
5.2	3D-Standardabweichungen verschiedener Messobjekte am „hiScanp“-System unter Verwendung einer vollständigen Mustersequenz . . . . .	99
5.3	3D-Standardabweichungen von verschiedener Messobjekte bei Einzelzeitpunktauswertungen mithilfe einer 2D-WFT-Frequenzanalyse von Bildaufnahmen des hiScanp-Systems . . . . .	102
5.4	Analog zu Abbildung 5.9 3D-Standardabweichungen $\sigma^{3D}$ zwischen bewegungskompensierten 3D-Punktwolken und dreiecksbasierten Oberflächenrepräsentationen mit induzierter Rotationsbewegung um die X-Achse. . . . .	110
A.1	Vergleich der zweidimensionalen Analyseverfahren von Interferogrammen auf FTP-Basis: 2D-FTP und 2D-AWFTP . . . . .	117

A.2	Prozentuale Abweichungen ermittelter Bewegungsgrößen zwischen 3D-Punktwolken je zwei aufeinander folgender Aufnahmezeitpunkte gegenüber der systeminduzierten Ground-Truth-Rotationsbewegung . . . . .	121
A.3	3D-Standardabweichungen zwischen bewegungskompensierten 3D-Punktwolken und dreiecksbasierten Oberflächenrepräsentationen des jeweiligen Messobjektes als vereinigt Resultat von zwölf Messpositionen und jeweiliger Verwendung einer vollständigen Mustersequenz . . . . .	122

## Algorithmenverzeichnis

- 3.1 Bestimmung der Beleuchtungsparameter  $a_n^c(x, y)$  und  $b_n^c(x, y)$  unter Nutzung eines  
schwelligwertbasiert maximalen Bereiches an Bildpunkten der Umgebung des jeweils  
betrachteten Bildpunktes  $(x, y)$  – aus [Bre13]. . . . . 50





## Liste eigener Publikationen

### Erstautorschaften

- [Bre12a] A. Breitbarth. „Praktische Anwendungen: Hochdynamische 3D-Verfahren“. In: *Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion: Seminar mit Praktikum*. Hrsg. von M. Sackewitz und R. Fischer. Fraunhofer VISION, Dez. 2012.
- [Bre14] A. Breitbarth. „Muster- und Streifenprojektionsverfahren / Hochdynamische 3D-Verfahren“. In: *Leitfaden 14: Optische 3D-Messtechnik*. Hrsg. von M. Sackewitz, R. Fischer und K. Spinnler. Bd. 14. Fraunhofer-Allianz Vision, Okt. 2014. Kap. Verfahren und Methoden, S. 20–23. ISBN: 978-3-8396-0761-9.
- [Bre11a] A. Breitbarth, I. Schmidt, P. Kühmstedt und G. Notni. „Geschwindigkeitsoptimierung eines hochauflösenden, maschinenintegrierbaren 3D-Sensors auf Basis Streifenprojektion“. In: *DGaO Proceedings*. Bd. 112. 2011, A35.
- [Bre11b] A. Breitbarth, P. Kühmstedt, I. Schmidt, C. Bräuer-Burchardt und G. Notni. „Streifenlichtbasierter 3D-Hochgeschwindigkeitssensor unter Nutzung der Epipolargeometrie“. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Bd. 10. Wichmann Verlag, 2011, S. 248–257.
- [Bre12b] A. Breitbarth, P. Kühmstedt, G. Notni und J. Denzler. „Motion compensation for three-dimensional measurements of macroscopic objects using fringe projection“. In: *DGaO Proceedings*. Bd. 113. 2012, A11.
- [Bre13] A. Breitbarth, P. Kühmstedt, G. Notni und J. Denzler. „Lighting estimation in fringe images during motion compensation for 3D measurements“. In: *Proceedings SPIE: Videometrics, Range Imaging, and Applications XII; and Automated Visual Inspection*. Hrsg. von F. Remondino, M. R. Shortis, J. Beyerer und F. P. León. Bd. 8791. Mai 2013, 87910P.1–87910P.9. DOI: 10.1117/12.2020500.
- [Bre15] A. Breitbarth, E. Müller, P. Kühmstedt, G. Notni und J. Denzler. „Phase unwrapping of fringe images for dynamic 3D measurements without additional pattern projection“. In: *Proceedings SPIE: Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications IV*. Bd. 9489. Apr. 2015.

### Coautorschaften

- [BB11a] C. Bräuer-Burchardt, A. Breitbarth, C. Munkelt, M. Heinze, P. Kühmstedt und G. Notni. „Calibration evaluation and calibration stability monitoring of fringe projection based 3D scanners“. In: *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (IARPS)*. Bd. XXXVIII-3/W22. PIA. Munich, Okt. 2011, S. 173–178.

- [BB11c] C. Bräuer-Burchardt, A. Breitbarth, P. Kühmstedt, I. Schmidt, M. Heinze und G. Notni. „Fringe Projection Based High Speed 3D Sensor for Real-Time Measurements“. In: *Proceedings SPIE: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII*. Hrsg. von P. H. Lehmann, W. Osten und K. Gasteringer. Bd. 8082. Mai 2011, S. 808212.1–808212.8. DOI: 10.1117/12.889459.
- [BB14b] C. Bräuer-Burchardt, A. Breitbarth, P. Kühmstedt und G. Notni. „High-speed three-dimensional measurements with a fringe projection-based optical sensor“. In: *Optical Engineering* 53.11 (Juni 2014), S. 112213.1–112213.8. DOI: 10.1117/1.OE.53.11.112213.
- [Hei13a] S. Heist, M. Sieler, A. Breitbarth, P. Kühmstedt und G. Notni. „High-speed 3D shape measurement using array projection“. In: *Proceedings SPIE: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*. Hrsg. von P. H. Lehmann, W. Osten und A. Albertazzi. Bd. 8788. Mai 2013, S. 878815.1–878815.11. DOI: 10.1117/12.2020539.
- [Hei13b] S. Heist, M. Sieler, A. Breitbarth, P. Kühmstedt und G. Notni. „Hochgeschwindigkeits-3D-Formvermessung mittels Array-Projektion“. In: *DGaO Proceedings*. Bd. 114. 2013, A18.
- [Küh11a] P. Kühmstedt, M. Heinze, I. Schmidt, C. Bräuer-Burchardt, A. Breitbarth und G. Notni. „Entwicklung eines handgeführten 3D-Farbscanners“. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Bd. 10. Wichmann Verlag, 2011, S. 199–204.
- [Küh11b] P. Kühmstedt, C. Bräuer-Burchardt, I. Schmidt, M. Heinze, A. Breitbarth und G. Notni. „Hand Held 3D Sensor for Documentation of Fossil and Archaeological Excavations“. In: *Proceedings SPIE: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III*. Bd. 8084. Mai 2011, 80840U.1–80840U.8. DOI: 10.1117/12.889477.
- [Mun10] C. Munkelt, A. Breitbarth, G. Notni und J. Denzler. „Multi-View Planning for Simultaneous Coverage and Accuracy Optimisation“. In: *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. Hrsg. von F. Labrosse, R. Zwigelaar, Y. Liu und B. Tiddeman. BMVA Press, Sep. 2010, S. 118.1–118.11. ISBN: 1-901725-40-5. DOI: 10.5244/C.24.118.

## Patent

- [Bre12c] A. Breitbarth, G. Notni, P. Kühmstedt, P. Schreiber und M. Sieler. „Projektionssystem mit statistischen Mustererzeugungselementen und mehreren optischen Kanälen zur optischen 3D-Vermessung“. deutsch. Pat. DE102012206472A1. 2012.

## Patentanmeldung

- [Bre12d] A. Breitbarth, G. Notni und P. Kühmstedt. „Verfahren und System zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Oberfläche eines Objekts“. deutsch. Pat. DE102012022952.6. 2012.

## Betreute Abschlussarbeiten

### Masterarbeit

Eric Müller, Sep. 2014. „Dreidimensionale Objektvermessung aus Streifenbildern eines Zeitpunktes basierend auf Verstetigung mithilfe von Segmentvergleichen“. Hochschulbetreuung durch Prof. Dr. R. Ewerth (EAH Jena), Abschluss: 1,0.

### Bachelorarbeiten

Kevin Srokos, Jun. 2014. „Aufbau und Charakterisierung eines 3D-Triangulationssensors unter Verwendung von Zeilenkameras“. Hochschulbetreuung durch Prof. Dr. rer. nat. habil. B. Fleck (EAH Jena), Abschluss: 1,0.

Eric Müller, Okt. 2012. „Charakterisierung eines Multiapertur-Projektionssystems für die 3D-Vermessung mittels aktiver Streifenlichtprojektion“. Hochschulbetreuung durch Prof. Dr. rer. nat. A. Richter (EAH Jena), Abschluss: 1,3.

### Komplexpraktikum

Eric Müller, Jan. 2014. „Single-Shot-Analyse zur Bestimmung von 3D-Informationen“. Hochschulbetreuung durch Prof. Dr. R. Ewerth (EAH Jena), Abschluss: 1,0.

## Vorträge

A. Breitbarth. „Hochdynamische 3-D-Verfahren“. Fraunhofer-Allianz VISION Seminar mit Praktikum „Optische 3-D-Messtechnik für die Qualitätssicherung“, Magdeburg, Nov. 2013.

A. Breitbarth. „Hochdynamische 3-D-Verfahren“. Fraunhofer-Allianz VISION Seminar mit Praktikum „Optische 3-D-Messtechnik für die Qualitätssicherung“, Jena, Dez. 2012.

A. Breitbarth, I. Schmidt, P. Kühmstedt und G. Notni. „3-D-Messung mit extrem kurzer Zykluszeit in Fertigungsprozessen“. Fraunhofer-Allianz VISION Technologietag, Magdeburg, Nov. 2011.

A. Breitbarth, I. Schmidt, P. Kühmstedt und G. Notni. „3-D-Messung mit extrem kurzer Zykluszeit in Fertigungsprozessen“. Fraunhofer-Allianz VISION Technologietag, Kaiserslautern, Jun. 2011.

A. Breitbarth. „High-Speed 3D-Messen: Prinzipien und Anwendungen“. Institutsseminar des Fraunhofer IOF, Jena, Jun. 2011.

A. Breitbarth, P. Kühmstedt, M. Heinze, I. Schmidt und G. Notni. „Ultra-mobile 3D-Messtechnik – Handgeführter 3D-Scanner 'kolibri Cordless'“. XI. Internationaler Polizeiarbeitsworkshop „Photogrammetrie und Laserscanning“, Neuss, Jul. 2011.

A. Breitbarth, P. Kühmstedt, M. Heinze, I. Schmidt und G. Notni. „Ultra-mobile 3D-Messtechnik – Handgeführter 3D-Scanner 'kolibri Cordless'“. Messe photokina 2010, Köln, Sep. 2010.

A. Breitbarth. „Grafikkarten-beschleunigte Berechnungen – CUDA und OpenCL“. Projekt-Workshop, Jena, Aug. 2010.



# Lebenslauf

## *Persönliche Daten*

Name: Andreas Martin Maximilian Breitbarth

Geboren: 05. Juli 1984 in Jena

Familienstand: ledig, keine Kinder

## *Ausbildung / Beruflicher Werdegang*

- |             |  |
|-------------|--|
| 2009 – 2015 | Bearbeitung der vorliegenden Doktorarbeit unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler am Lehrstuhl Digitale Bildverarbeitung der Friedrich-Schiller-Universität Jena                                      |
| 2009 – 2015 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena  |
| 2003 – 2008 | Diplomstudium der Informatik mit Nebenfach Wirtschaftswissenschaften an der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Vertiefungsrichtung: Technische und Angewandte Informatik, Schwerpunkt: Digitale Bildverarbeitung |
| ↔ 2008      | Diplomarbeit über „Ausnutzen geometrischer Constraints zur Bestimmung von Punktkorrespondenzwahrscheinlichkeiten bei großer Baseline“ unter der Leitung von Dipl.-Inf. Ferid Bajramovic                            |
| ↔ 2007      | Studienarbeit über „Robuste Erkennung von Spielkarten in Untertisch-aufnahmen“ unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler  |
| 1995 – 2003 | Gymnasium 'Am Anger' in Jena, Abschluss mit Abitur   |
| 1991 – 1995 | Grundschule 'Heinrich Heine' in Jena   |

Jena, den 05. März 2015

Unterschrift





## Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich,

- dass mir die Promotionsordnung der Fakultät für Mathematik und Informatik bekannt ist,
- dass ich die Dissertation selbst angefertigt habe, keine Textabschnitte oder Ergebnisse eines Dritten oder eigenen Prüfungsarbeiten ohne Kennzeichnung übernommen und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönliche Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben habe,
- dass ich die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen habe und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,
- dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes haben mich folgende Personen unterstützt:

Eric Müller

.....

Ich habe die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche bzw. eine andere Abhandlung\* bereits bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht: ~~Ja~~/ Nein\*.

(\* Zutreffendes unterstreichen)

Wenn Ja, Name der Hochschule: .....

Ergebnis: .....

Jena, den 05. März 2015

Unterschrift